



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Ανάλυση Μεγάλων Δεδομένων Παραγωγής σε Βιομηχανία Κατασκευής Ημιαγωγών
για την Εκτίμηση Βασικών Μέτρων Απόδοσης και Σχέσεων Μεταξύ τους

Κωνσταντινίδης Γεώργιος

Μεσσής Ανδρέας

Επιβλέπων Καθηγητής: Λυμπερόπουλος Γεώργιος

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση

Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος 2018

©2018 Κωνσταντινίδης Γεώργιος και Μεσσής Ανδρέας

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα μέλη της Εξεταστικής Επιτροπής

Πρώτος εξεταστής (Επιβλέπων):

Δρ. Γεώργιος Λυμπερόπουλος

Καθηγητής του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος εξεταστής:

Δρ. Δημήτριος Παντελής

Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος εξεταστής:

Δρ. Γεώργιος Κοζανίδης

Επίκουρος Καθηγητής του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Αρχικά, θέλουμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας μας κ. Γεώργιο Λυμπερόπουλο, τόσο για την ευκαιρία που μας προσέφερε να ασχοληθούμε με αυτήν τη διπλωματική εργασία, όσο και για την καθοριστική συμβολή του στη εκπόνησή της. Επίσης, οφείλουμε να ευχαριστήσουμε τους καθηγητές κκ. Δημήτριο Παντελή και Γεώργιο Κοζανίδη για την ανάγνωση της εργασίας μας και τη συμμετοχή τους ως εξεταστές της.

Ευχαριστούμε ακόμα, τη [REDACTED] καθώς η μελέτη της βιομηχανίας της, αποτέλεσε τη δομή της διπλωματικής μας εργασίας. Σημαντικό στοιχείο για εμάς αποτέλεσε, τόσο η λήψη χρήσιμων δεδομένων, που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση μας, όσο και η έγκαιρη επεξήγησή τους, σε απορίες που μας εκδηλώθηκαν.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλουμε στον υποψήφιο διδάκτορα Μιχάλη Δελγιάννη για τη βοήθεια του που έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην ολοκλήρωση της εργασίας. Η συνεργασία μας ήταν συνεχής, με αποτέλεσμα την έγκαιρη παράδοσή της. Ένα μεγάλο κομμάτι της τελικής της μορφής οφείλεται σε αυτόν.

Ευχαριστούμε τον κ. Ιωάννη Λυχναρόπουλο, μέλος Εργαστηριακού Διδακτικού Προσωπικού (ΕΔΙΠ) του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, για τη συνεισφορά του μέσω χρήσιμων υποδείξεων στο Excel. Ακόμη, οφείλουμε ένα μεγάλο ευχαριστώ στο Χριστόφορο Μπέκο για την πολύτιμη βοήθειά του με τη δημιουργία ενός χρήσιμου για την έρευνά μας κώδικα στη Matlab.

Για τη στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια, επιθυμούμε να εκφράσουμε την αμέριστη ευγνωμοσύνη μας στις οικογένειές μας. Χάρης σε αυτές, καταφέραμε να ολοκληρώσουμε με επιτυχία τις σπουδές μας σε διάρκεια πέντε χρόνων. Επίσης, τους φίλους μας που μας υποστήριζαν και που πάντα ενδιαφέρονταν για την πορεία της εργασίας.

Τέλος, θέλουμε να ευχαριστήσουμε ο ένας τον άλλον για την επιτυχή συνεργασία μας. Μπορεί να υπομείναμε πολλά, να διαφωνήσαμε αρκετά, αλλά στο τέλος καταφέραμε να πετύχουμε τον κοινό μας στόχο, την ολοκλήρωση της διπλωματικής μας εργασίας.

Γιώργος Κωνσταντινίδης και Ανδρέας Μεσσής

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού ερευνητικού έργου « [REDACTED] » που στοχεύει στη βελτίωση της ψηφιοποίησης της ευρωπαϊκής βιομηχανίας μέσω της ηλεκτρονικής και της Τεχνολογίας Πληροφοριών και Επικοινωνίας (ICT). Το έργο αυτό αποτελεί τη μεγαλύτερη ευρωπαϊκή ερευνητική προσπάθεια μέχρι σήμερα στο πλαίσιο της πρωτοβουλίας αυτοματοποίησης και ανταλλαγής δεδομένων στις βιομηχανικές τεχνολογίες Industry4.0.

Το Εργαστήριο Οργάνωσης Παραγωγής (ΕΟΠ) του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας συνεργάζεται με μια ομάδα επιχειρήσεων και ερευνητικών φορέων στο πλαίσιο αυτού του έργου, με σκοπό την εικονικοποίηση (virtualisation) των διαδικασιών και την ψηφιακή διαχείριση της παραγωγής και των δικτύων εφοδιασμού στη βιομηχανία. Κεντρικό ρόλο σε αυτή τη συνεργασία έχει η βιομηχανία [REDACTED] η οποία συμμετέχει μέσω του εργοστασίου της παραγωγής ημιαγωγών του τομέα κατασκευής ηλεκτρονικών για την αυτοκινητοβιομηχανία στο [REDACTED] της [REDACTED]. Στο πλαίσιο της συνεργασίας, η [REDACTED] παρείχε στο ΕΟΠ λεπτομερή δεδομένα της παραγωγής (αφού τα κατέστη «ανώνυμα») που καλύπτουν τη χρονική διάρκεια ενός μηνός και λιγότερο λεπτομερή δεδομένα για ένα έτος. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση αυτών των δεδομένων, προκειμένου να εκτιμηθούν οι χρόνοι κύκλου παραγωγής και να εξαχθούν συμπεράσματα.

Βασικό χαρακτηριστικό της βιομηχανίας κατασκευής ημιαγωγών (semiconductor manufacturing) είναι ο πολύ μεγάλος αριθμός των σταδίων επεξεργασίας των προϊόντων, η πολυπλοκότητα της ροής υλικών και η μεταβλητότητα των χρόνων παραγωγής. Αποτέλεσμα είναι συχνά να υπάρχουν καθυστερήσεις στους χρόνους παραγωγής του τελικού προϊόντος και κατ' επέκταση στην τήρηση προθεσμιών. Η παρούσα διπλωματική αποτελεί μια προσπάθεια εκτίμησης αυτών των χρόνων, καθώς και σχέσεων τους με άλλα σημαντικά μέτρα απόδοσης όπως ο αριθμός εργασιών σε εξέλιξη. Ευελπιστούμε τα αποτελέσματα της έρευνας μας να βοηθήσουν την εταιρία να εξάγει ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα για την παραγωγή της.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	1
1.1 Κίνητρο και υπόβαθρο	1
1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	2
1.3 Δομή εργασίας	4
Κεφάλαιο 2 Κατασκευή Ημιαγωγών	5
2.1 Πληροφορίες για τη βιομηχανία ημιαγωγών	5
2.1.1 Οι ημιαγωγοί σήμερα	6
2.1.2 Χρήση των ημιαγωγών	7
2.1.3 Ανταγωνισμός στη βιομηχανία ημιαγωγών	7
2.2 Παραγωγική διαδικασία στη βιομηχανία ημιαγωγών	8
2.2.1 Στάδια παραγωγής	8
2.2.2 Front-end/Back-end	12
2.3 Το στάδιο κατασκευής ηλεκτρονικών πλακιδίων	12
2.3.1 Είδη των wafer fabs	13
2.3.2 Χειριστές, Αξιοπιστία και Συντήρηση μηχανών	14
2.4 Περιοχές του Wafer Fab	15
2.5 Μέτρα απόδοσης	18
2.6 Κρίσιμοι παράγοντες και σύγχρονες προκλήσεις	19
Κεφάλαιο 3 Το project	23
3.1 Εισαγωγικές έννοιες	23
3.2 Ο ρόλος της	24
3.2.1 Η εφοδιαστική της αλυσίδα	25
3.2.2 Περιγραφή του φυσικού συστήματος	27
3.3 Περιγραφή των δεδομένων	29
Κεφάλαιο 4 Ανάλυση των Δεδομένων	32
4.1 Γενική επεξεργασία	32
4.1.1 Ο χρόνος κύκλου (cycle time)	34
4.2 Στατιστική ανάλυση δεδομένων	35
4.2.1 Περιγραφή της διαδικασίας	36
4.2.2 Παρουσίαση ιστογραμμάτων	38
4.3 Συσχετισμός επεξεργασιών με CT	44
4.4 Συσχετισμός WIP και επιμέρους CT	47
4.4.1 Καταγραφή δεδομένων για υπολογισμό WIP	48
4.4.2 Υπολογισμός WIP	50
4.4.3 Κατασκευή διαγραμμάτων WIP-CT	51
4.4.4 Διαγράμματα WIP-CT και -WIP	54
Κεφάλαιο 5 Σχολιασμός - Συμπεράσματα	63
5.1 Σχολιασμός διαγραμμάτων WIP-CT και Time-WIP	63
5.2 Σχολιασμός ιστογραμμάτων CT	67
5.3 Σχολιασμός διαγραμμάτων CT-operations	67
Βιβλιογραφία	69
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Κώδικας υπολογισμού καλύτερης κατανομής	71
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Κώδικας για καταμέτρηση WIP	78

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1 Στάδια της βιομηχανίας ημιαγωγών	9
Σχήμα 2.2 Κύριες περιοχές παραγωγής σε ένα wafer fab	18
Σχήμα 3.1 Δομή αλυσίδας εφοδιασμού	26
Σχήμα 3.2 Απεικόνιση δεδομένων	30
Σχήμα 4.1 Ιστόγραμμα του █████	38
Σχήμα 4.2 Ιστόγραμμα του █████	39
Σχήμα 4.3 Ιστόγραμμα του █████	40
Σχήμα 4.4 Ιστόγραμμα του █████	40
Σχήμα 4.5 Ιστόγραμμα του █████	41
Σχήμα 4.6 Ιστόγραμμα του █████	41
Σχήμα 4.7 Ιστόγραμμα του █████	42
Σχήμα 4.8 Ιστόγραμμα του █████	42
Σχήμα 4.9 Ιστόγραμμα του █████	43
Σχήμα 4.10 Διάγραμμα CT-operations για το █████	45
Σχήμα 4.11 Διάγραμμα CT-operations για το █████	46
Σχήμα 4.12 Διάγραμμα CT-operations για το █████	46
Σχήμα 4.13 Διάγραμμα CT-operations για το █████	47
Σχήμα 4.14 Δεδομένα προς απεικόνιση από το █████	52
Σχήμα 4.15 Διάγραμμα WIP-CT για το █████	54
Σχήμα 4.16 Διάγραμμα Time-WIP για το █████	54
Σχήμα 4.17 Διάγραμμα WIP-CT για το █████	55
Σχήμα 4.18 Διάγραμμα Time-WIP Για το █████	55
Σχήμα 4.19 Διάγραμμα WIP-CT για το █████	56
Σχήμα 4.20 Διάγραμμα Time-WIP για το █████	56
Σχήμα 4.21 Διάγραμμα WIP-CT για το █████	57
Σχήμα 4 22 Διάγραμμα Time-WIP για το █████	57
Σχήμα 4.23 Διάγραμμα WIP-CT για το █████	58
Σχήμα 4.24 Διάγραμμα Time-WIP για το █████	58
Σχήμα 4.25 Διάγραμμα WIP-CT για το █████	59
Σχήμα 4.26 Διάγραμμα Time-WIP για το █████	59
Σχήμα 4.27 Διάγραμμα WIP-CT για το █████	60
Σχήμα 4.28 Διάγραμμα Time-WIP για το █████	60

Σχήμα 4.29 Διάγραμμα WIP-CT για το █████	61
Σχήμα 4.30 Διάγραμμα Time-WIP για το █████	61
Σχήμα 4.31 Διάγραμμα WIP-CT για το █████	62
Σχήμα 4.32 Διάγραμμα Time-WIP για το █████	62

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων στατιστικής ανάλυσης	44
Πίνακας 5.1 Στατιστικά και μέτρα απόδοσης (1 ^ο μέρος)	65
Πίνακας 5.2 Στατιστικά και μέτρα απόδοσης (2 ^ο μέρος)	65

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται το κίνητρο και το υπόβαθρο της διπλωματικής εργασίας. Επίσης, γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση που αναφέρεται στον προγραμματισμό και έλεγχο παραγωγής στη βιομηχανία ημιαγωγών (semiconductor industry), ενώ στο τέλος παρουσιάζεται συνοπτικά η δομή της εργασίας.

1.1 Κίνητρο και υπόβαθρο

Το κίνητρο για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ολοένα αυξανόμενη σημασία της ανάλυσης μεγάλων δεδομένων στη βιομηχανία με σκοπό την αποκάλυψη αλληλεπιδράσεων, σχέσεων, μοτίβων, κτλ., μεταξύ σημαντικών μεγεθών όπως είναι η παροχή, ο αριθμός εργασιών σε εξέλιξη, ο χρόνος κύκλου, κ.α. Απώτερος σκοπός της ανάλυσης αυτής είναι ο καλύτερος σχεδιασμός, προγραμματισμός και έλεγχος της παραγωγής και των συναφών λειτουργιών.

Η ευκαιρία για την ενασχόληση με το θέμα αυτό δόθηκε με τη συμμετοχή του Εργαστηρίου Οργάνωσης Παραγωγής (ΕΟΠ) του Τομέα Οργάνωσης Παραγωγής και Βιομηχανικής Διοίκησης του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στο ερευνητικό έργο «[REDACTED] [REDACTED] [REDACTED]». Το έργο αυτό ξεκίνησε την [REDACTED], έχει διάρκεια τρία έτη και χρηματοδοτείται από την κοινοπραξία Electronic Components and Systems for European Leadership Joint Undertaking (ECSEL JU). Η κοινοπραξία αυτή χρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα Έρευνας και Καινοτομίας H2020 και Εθνικές Αρχές Χρηματοδότησης.

Ο κύριος σκοπός του έργου είναι η σημαντική βελτίωση στην ψηφιοποίηση (digitalization) της ευρωπαϊκής βιομηχανίας μέσω της ηλεκτρονικής και της Τεχνολογίας Πληροφορικής και Επικοινωνίας (ICT). Το έργο αυτό αποτελεί τη μεγαλύτερη ευρωπαϊκή ερευνητική προσπάθεια μέχρι σήμερα στο πλαίσιο της πρωτοβουλίας αυτοματοποίησης και ανταλλαγής δεδομένων στις βιομηχανικές τεχνολογίες Industry4.0.

Ο συνολικός προϋπολογισμός του έργου είναι [REDACTED] εκατομμύρια ευρώ εκ των οποίων τα [REDACTED] εκατομμύρια προέρχονται από την ΕΕ μέσω της Κοινοπραξίας ECSEL

και άλλα τόσα περίπου από τις Εθνικές Αρχές Χρηματοδότησης των συμμετεχόντων κρατών. Ο υπόλοιπος προϋπολογισμός καλύπτεται από ίδιους πόρους των συμμετεχόντων φορέων. Στο έργο συμμετέχουν [redacted] εταίροι από [redacted] κράτη. Η βιομηχανία συμμετέχει σε ποσοστό 65%. Μεταξύ των σημαντικότερων βιομηχανικών εταίρων είναι οι [redacted] [redacted] [redacted] [redacted] [redacted] [redacted] [redacted] [redacted] [redacted] και πολλοί άλλοι. Μεταξύ των ερευνητικών εταίρων περιλαμβάνονται οι Karlsruhe Institute of Technology, Fraunhofer Gesellschaft, TU Dresden, Institute Mines-Télécom, TU Eindhoven, TU Wien, Politecnico di Milano, και πολλοί άλλοι. Συντονιστής του έργου είναι η [redacted].

Στο πλαίσιο του έργου [redacted] η [redacted] έθεσε στη διαθεσιμότητα ορισμένων εταίρων του έργου, μεταξύ των οποίων και το ΕΟΠ, ένα αριθμό αρχείων με μεγάλα δεδομένα από την παραγωγική διαδικασία των παραγωγικών μονάδων της εφοδιαστικής αλυσίδας της για την κατασκευή ημιαγωγών για την αυτοκινητοβιομηχανία.

Η εργασία αυτή καταπιάνεται με την ανάλυση των δεδομένων αυτών με σκοπό τον χαρακτηρισμό των χρόνων κύκλου σε διάφορους κόμβους της αλυσίδας.

1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η βιομηχανία ημιαγωγών (semiconductor industry), είναι μία από τις πιο ραγδαία αναπτυσσόμενες βιομηχανίες παγκοσμίως. Η ανάπτυξη αυτή αντικατοπτρίζεται στην παραγωγή επιστημονικής γνώσης τόσο γύρω από την τεχνολογία κατασκευής ημιαγωγών όσο και αναφορικά με τη διαχείριση της παραγωγής και των δικτύων εφοδιασμού στη βιομηχανία αυτή. Η παραγωγή γνώσης αποτυπώνεται σε δημοσιεύσεις (άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά και πρακτικά συνεδρίων, κεφάλαια σε τόμους βιβλίων, διατριβές, μονογραφίες και βιβλία), πατέντες, λογισμικό, και άλλες μορφές δημοσιοποίησης. Στην ενότητα αυτή γίνεται αναφορά σε κάποιες από τις βασικές δημοσιεύσεις στην διαχείριση της παραγωγής και των δικτύων εφοδιασμού στη βιομηχανία ημιαγωγών.

Η εργασία των Uzsoy et al. (1992) είναι μια από τις πρώτες προσπάθειες καταγραφής της διαδικασίας της κατασκευής ημιαγωγών και καταμερισμού της στα βασικά της στάδια. Στην ίδια εργασία αναφέρονται οι βασικοί παράγοντες που καθιστούν εξαιρετικά δύσκολο το σχεδιασμό και προγραμματισμό παραγωγής στη

συγκεκριμένη βιομηχανία, όπως είναι η τεράστια πολυπλοκότητα, οι επιστρεφόμενες ροές, κτλ.

Οι Connors et al. (1996) ανέπτυξαν ένα μοντέλο δικτύων ουρών εξειδικευμένο για τη βιομηχανία ημιαγωγών. Χώρισαν τα προϊόντα σε οικογένειες προϊόντων με κοινή αλληλουχία επεξεργασίας σε μια συγκεκριμένη ομάδα μηχανών και επικεντρώθηκαν στους μηχανισμούς της απόρριψης προϊόντων και/ή επανεπεξεργασίας τους λόγω ποιοτικών προβλημάτων καθώς και στα είδη μηχανών (παράλληλη, σειριακή επεξεργασία, κτλ).

Πιο πρόσφατα, οι Mathirajan και Sivakumar (2006) κάνουν λόγο για επεξεργασία προϊόντων σε παρτίδες (batch processing), ενώ παράλληλα εξειδικεύουν περαιτέρω τα στάδια παραγωγής στη βιομηχανία ημιαγωγών. Για παράδειγμα, η κατασκευή πλακιδίων (wafer fabrication), που αποτελεί βασικό στάδιο παραγωγής, αναλύεται με τη σειρά του, σε άλλα επιμέρους στάδια.

Οι Gupta et al. (2006) αναφέρονται λεπτομερώς, στην παραγωγή πλακιδίων (wafers), κάνοντας ιδιαίτερη μνεία στην πολυπλοκότητά τους, στον τύπο κατασκευής τους και στους παράγοντες που περιπλέκουν τη λειτουργία τους. Σε ένα άλλο πρόσφατο άρθρο (2008), οι Ehm et al., περιγράφει τις τοποθεσίες που λαμβάνουν χώρα τα στάδια της βιομηχανίας ημιαγωγών, ενώ οι Geng και Jiang (2009) αναφέρονται στο σχεδιασμό δυναμικότητας παραγωγής (capacity planning) και τις δυσκολίες του.

Οι Manzur και Islam (2010) και οι Mönch et al. (2011) επαναλαμβάνουν την περιγραφή της βιομηχανίας ημιαγωγών με πιο γενικό, αλλά και με ειδικό τρόπο. Το θέμα της προγραμματισμού και ελέγχου παραγωγής στη βιομηχανία ημιαγωγών αναπτύσσεται σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια στο πρόσφατο βιβλίο των Mönch et al. (2013). το οποίο περιλαμβάνει μεγάλο όγκο δεδομένων και διεισδύει πιο βαθιά στο συγκεκριμένο τομέα.

Τέλος, οι δημοσιεύσεις αναφορικά με την ανάλυση πραγματικών δεδομένων παραγωγής στη βιομηχανία ημιαγωγών, και συγκεκριμένα στην κατασκευή πλακιδίων, είναι σπάνιες. Μια πρόσφατη εργασία σε αυτή την περιοχή, είναι η εργασία των Tirkel και Parmet (2017), όπου μελετάται ο χρόνος κύκλου (cycle time) και οι πιθανοτικές κατανομές που ταιριάζουν σε αυτόν με βάση ένα μεγάλο δείγμα δεδομένων. Η εργασία αυτή είναι ίσως η πιο σχετική με παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας και αποτέλεσε σημείο αναφοράς για αυτήν.

1.3 Δομή εργασίας

Στην υπόλοιπή της έκταση, η εργασία αποτελείται από τέσσερα επιπρόσθετα κεφάλαια. Κάθε κεφάλαιο, έχει δομηθεί με τρόπο τέτοιο, ώστε να γίνει κατανοητό στον αναγνώστη. Πιο συγκεκριμένα:

Στο Κεφάλαιο 2 επιχειρούμε να πληροφορήσουμε τον αναγνώστη γενικότερα γύρω από τη βιομηχανία των ημιαγωγών. Πιο συγκεκριμένα, περιέχεται μια ιστορική αναδρομή, αναλύονται τα διάφορα στάδια παραγωγής και επεξεργασίας, ενώ καταγράφονται και ορισμένες σύγχρονες προκλήσεις του χώρου αυτού.

Στο Κεφάλαιο 3 παρέχονται οι σημαντικότερες πληροφορίες σχετικά με το πρόγραμμα ██████████. Επισημαίνεται ο ρόλος που έχει το τμήμα μας σε αυτό, καθώς και ο αντίστοιχος της ████████. Επίσης, δείχνονται τα διάφορα στάδια της εφοδιαστικής της αλυσίδας, ενώ πραγματοποιείται και μια γενική περιγραφή των δοθέντων από τη ████████ δεδομένων.

Το Κεφάλαιο 4 ξεκινά με μια περιγραφή των χρήσιμων για τη διπλωματική μας δεδομένων και εισάγονται οι έννοιες των μέτρων απόδοσης που υπολογίζουμε στη συνέχεια. Στο πρώτο μέρος του κεφαλαίου, μετά το εισαγωγικό κομμάτι, λαμβάνει χώρα μια στατιστική ανάλυση του CT των παρτίδων των δεδομένων και στο τέλος παρέχονται τα ιστογράμματα του CT για κάθε περιοχή παραγωγής, σε συνδυασμό με το στατιστικό υπόβαθρο, για το αν ταιριάζουν τα εκάστοτε δεδομένα σε κάποια γνωστή κατανομή. Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου, αναλύονται λεπτομερώς, οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν προκειμένου να εξάγουμε τις σχέσεις WIP-CT και Time-WIP στις διάφορες περιοχές παραγωγής της ████████ και έπειτα παρέχονται τα εν λόγω διαγράμματα.

Στο Κεφάλαιο 5 καταλήγουμε με ένα γενικότερο σχολιασμό των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το σύνολο της εργασίας και εξάγονται ορισμένα συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 2 Κατασκευή Ημιαγωγών

2.1 Πληροφορίες για τη βιομηχανία ημιαγωγών

Με τον όρο ημιαγωγό (semiconductor) εννοούμε ένα υλικό, το οποίο έχει ηλεκτρική αγωγιμότητα μεγαλύτερη από ένα μονωτή, αλλά μικρότερη από έναν αγωγό, δηλαδή περίπου της τάξεως του 8-103 Siemens/cm. Συσκευές κατασκευασμένες από ημιαγωγίμα υλικά, αποτελούν τα θεμέλια της σύγχρονης ηλεκτρονικής, όπως είναι οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, το τηλέφωνο, το ραδιόφωνο και πολλές ακόμη συσκευές. Οι ημιαγωγίμες συσκευές (semiconductor devices) περιλαμβάνουν διάφορους τύπους τρανζίστορ, ηλιακά κύτταρα (solar cells), πολλά είδη διόδων (light-emitting diode), πυριτιο-κατευθυνόμενος ανορθωτής (silicon controlled rectifier) και ψηφιακά και αναλογικά ενσωματωμένα κυκλώματα (integrated circuits). Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά πάνελ είναι ουσιαστικά μεγάλες ημιαγωγίμες συσκευές που μετατρέπουν απευθείας την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο είναι ικανό να αλλάξει την αντίσταση του ημιαγωγού. Σε ένα μεταλλικό αγωγό, το ρεύμα μεταφέρεται μέσω της ροής των ηλεκτρονίων. Στους ημιαγωγούς όμως, το ρεύμα μπορεί να μεταφερθεί, είτε με τη ροή των ηλεκτρονίων, είτε με τη ροή θετικά φορτισμένων «τρυπών» στη δομή ηλεκτρονίων του υλικού.

Τα συνηθέστερα υλικά ημιαγωγών (semiconductor materials) είναι κρυσταλλικά στερεά. Ωστόσο, υπάρχουν και άλλα υλικά, όπως μίγματα αρσενικού, σεληνίου και τελλουρίου σε μια ποικιλία αναλογιών. Διαθέτουν ευρεία γκάμα αγωγιμότητας, αλλά τους λείπει η άκαμπτη κρυσταλλική δομή των συμβατικών ημιαγωγών, όπως για παράδειγμα του πυριτίου και κατά συνέπεια, δεν επηρεάζονται τόσο από ακαθαρσίες και την ακτινοβολία.

Το πυρίτιο (silicon) χρησιμοποιείται για την κατασκευή των περισσότερων ημιαγωγών στο εμπόριο, ενώ χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά, όπως είναι το γερμάνιο, το αρσενικούχο γάλλιο και το καρβίδιο πυριτίου. Ένας καθαρός ημιαγωγός συχνά ονομάζεται «εγγενής» (intrinsic). Η αγωγιμότητα των συνηθών ημιαγωγίμων υλικών είναι δυνατόν να αλλάξει δραστικά με την προσθήκη άλλων στοιχείων, τις λεγόμενες ακαθαρσίες στο λιωμένο «εγγενές» υλικό και στη συνέχεια τη στερεοποίησή του σε ένα νέο, διαφορετικό κρύσταλλο. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται doping.

2.1.1 Οι ημιαγωγοί σήμερα

Για τους ημιαγωγούς μπορεί να ισχυριστεί κανείς άνετα, πως έχουν κατακτήσει την καθημερινότητά μας. Ο αριθμός των εφαρμογών και η ζήτηση στην αγορά για ενσωματωμένα κυκλώματα (integrated circuits), έχουν αυξηθεί δραματικά από την εφεύρεση του τρανζίστορ το 1948. Τα ενσωματωμένα κυκλώματα βρίσκονται στην καρδιά των πιο σύγχρονων ανέσεων μας, συμπεριλαμβανομένου των αυτοκινήτων, των προσωπικών υπολογιστών, των κινητών τηλεφώνων και της τηλεόρασης.

Η βιομηχανία ημιαγωγών (semiconductor manufacturing) αποτελεί μια από τις πιο ταχύτατα αναπτυσσόμενες βιομηχανίες στο κόσμο σήμερα, εξαιτίας της ποικιλίας που εμφανίζονται στην αγορά (ενσωματωμένα κυκλώματα για δίκτυα, αποθηκευτικά υλικά, τηλεπικοινωνίες, συστήματα πελατών, υπολογιστών και αποθήκευσης). Ουσιαστικά, πρόκειται για το σύνολο των εταιρειών που ασχολούνται με το σχεδιασμό και την κατασκευή ημιαγωγών. Η βιομηχανία ημιαγωγών έχει τις ρίζες της το 1960. Από τότε και από το Texas και την California που ξεκίνησε το συλλογικό αυτό εγχείρημα, έφτασε μέχρι σήμερα να έχει εξαπλωθεί σε ολόκληρο τον κόσμο, σε περιοχές όπως η Ευρώπη, η Ινδία, το Ισραήλ, η Ιαπωνία, η Σιγκαπούρη, η Κίνα και σε πολλές άλλες ακόμη. Ο μεγαλύτερος κατασκευαστής τη σήμερον ημέρα είναι η Intel, η οποία έχει εγκαταστήσει τόσο στην Ευρώπη, όσο και στην Ασία και στην Αμερική. Άλλοι μικρότεροι κατασκευαστές είναι η Samsung (Κορέα) και η Infineon (Ευρώπη).

Τα τελευταία χρόνια η Κίνα έχει ανέλθει στην κορυφή της αγοράς ημιαγωγών. Μάλιστα, με την αδιάκοπη εισροή κεφαλαίων στη χώρα αυτή, τις αυξημένες τεχνολογικές ικανότητες και το χαμηλό εργατικό κόστος, η βιομηχανία ημιαγωγών αναμένεται να συνεχίσει να «εκρήγνυται» και να γίνει μια από τις σημαντικότερες βιομηχανίες της χώρας. Δεδομένου του αυξημένου ανταγωνισμού παγκοσμίως, του βραχύχρονου κύκλου ζωής των προϊόντων και της πίεσης για χαμηλότερες τιμές, οι Κινέζοι κατασκευαστές ημιαγωγών, όπως και οι ανταγωνιστές τους ανά τον κόσμο, στρέφουν την προσοχή τους στη μείωση του κόστους, με το να καταστήσουν αποδοτικότερη τη λειτουργία. Οι τεχνολογίες αξιολόγησης της απόδοσης (performance evaluation) των ημιαγωγών, σχεδιασμού του συστήματος (system planning) και προγραμματισμού (scheduling) στοχεύουν στην ενίσχυση της αποδοτικότητας του συστήματος και παράλληλα στη διατήρηση του κέρδους τους.

2.1.2 Χρήση των ημιαγωγών

Οι ημιαγωγοί βρίσκουν εφαρμογή σε ποικίλες περιπτώσεις, μερικές από τις οποίες αναφέρονται παρακάτω:

1. **Μνήμη:** Τα μικροτσίπ μνήμης (memory chips) χρησιμεύουν ως προσωρινός αποθηκευτικός χώρος δεδομένων και ως μέσο για να μεταφέρει κανείς πληροφορίες από και προς τους «εγκεφάλους» των υπολογιστών. Η γενικευμένη ενοποίηση της αγοράς των μικροτσίπ οδηγεί τις τιμές σε τέτοια πτώση, ώστε μόνο λίγοι «γίγαντες» όπως η Toshiba, η Samsung και η NEC να μπορούν να μείνουν στο παιχνίδι.
2. **Μικροεπεξεργαστές (microprocessors):** Αποτελούν κεντρικής επεξεργασίας μονάδες που περιέχουν τη βασική λογική να εκτελούν αρμοδιότητες. Η κυριαρχία της Intel στο τμήμα των μικροεπεξεργαστών έχει οδηγήσει σχεδόν κάθε ανταγωνιστή, με εξαίρεση την Advanced Micro Devices, εκτός της βασικής αγοράς.
3. **Προϊόντα Ενσωματωμένων Κυκλωμάτων (Commodity Integrated Circuit):** Τα λεγόμενα «standard chips», παράγονται σε μεγάλες παρτίδες με σκοπό επεξεργασίες ρουτίνας. Κυριαρχούμενα από πολύ μεγάλους Ασιάτες κατασκευαστές μικροτσίπ, το συγκεκριμένο τμήμα προσφέρει περιορισμένα περιθώρια κέρδους, τα οποία μόνο οι μεγαλύτερες εταιρίες μικροεπεξεργαστών μπορούν να διεκδικήσουν.
4. **Complex SOC (System On a chip):** Αποτελεί ένα ενσωματωμένου κυκλώματος μικροτσίπ (integrated circuit chip) με την ικανότητα ενός ολόκληρου συστήματος μέσα σε αυτό. Η αγορά αναπτύσσεται γύρω από τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για προϊόντα, που συνδυάζουν νέα χαρακτηριστικά και χαμηλότερες τιμές. Σε σχέση με τα υπόλοιπα είδη ημιαγωγών που προαναφέρθηκαν, η παραγωγή των Complex SOC είναι πιο προσιτή σε περισσότερες επιχειρήσεις, υπό την έννοια ότι δεν υπάρχει σαφές μονοπώλιο.

2.1.3 Ανταγωνισμός στη βιομηχανία ημιαγωγών

Σημαντικοί παράγοντες ανταγωνισμού στη βιομηχανία ημιαγωγών είναι: 1) η ικανότητα άμεσης ενσωμάτωσης προηγμένων τεχνολογιών σε ηλεκτρονικά προϊόντα,

2) η συνεχής βελτίωση των διαδικασιών παραγωγής και 3) η ικανότητα τήρησης των προθεσμιών για τη μέγιστη ικανοποίηση του πελάτη.

2.2 Παραγωγική διαδικασία στη βιομηχανία ημιαγωγών

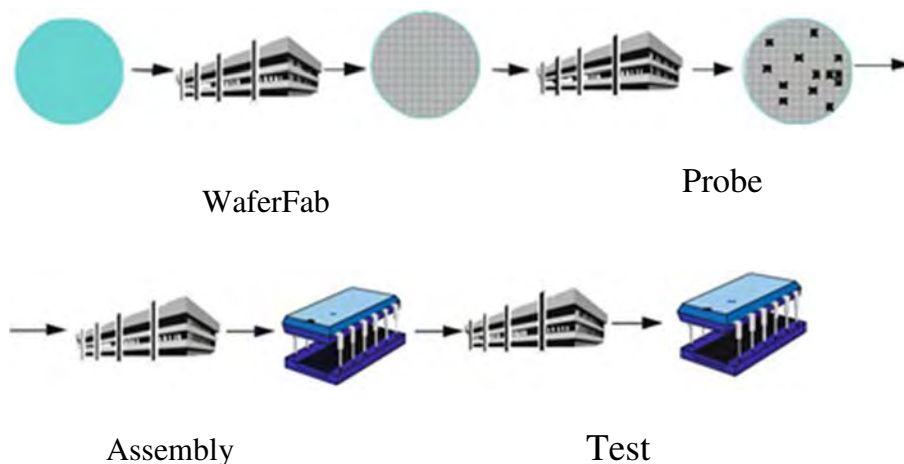
Ένα σύστημα παραγωγής (manufacturing system), έχει ως βασικό στόχο την παραγωγή αγαθών. Αποτελείται από το *βασικό σύστημα (base system ή BS)* και το *σύστημα πληροφοριών (information system ή IS)*. Το βασικό σύστημα ουσιαστικά, απαρτίζεται από τα επιμέρους εξαρτήματα, που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή των πρώτων υλών σε ενδιάμεσα και τελικά προϊόντα. Κανείς μπορεί να θεωρήσει σαν υποσυστήματά του, το *σύστημα επεξεργασίας εργασιών (job processing system ή JS)* και το *σύστημα ροής των υλικών (material flow system ή MS)*. Με τη σειρά του, το σύστημα επεξεργασίας εργασιών (JS) αποτελείται από όλα εκείνα τα επιμέρους στοιχεία, τα οποία συνεισφέρουν στην επεξεργασία και παραγωγή των προϊόντων. Τέτοια είναι για παράδειγμα οι μηχανές, οι χειριστές των μηχανών και άλλα βοηθητικά μέσα παραγωγής. Από την άλλη πλευρά, όλες οι δραστηριότητες που σχετίζονται με την αποθήκευση, τη μεταφορά και παροχή πρώτων υλικών, αποτελούν το σύστημα ροής των υλικών (MS).

Μία τέτοια διάρθρωση που περιγράφηκε πιο πάνω, ισχύει και για τις παραγωγικές μονάδες/βιομηχανίες ημιαγωγών.

2.2.1 Στάδια παραγωγής

Η διαδικασία με την οποία παράγονται οι ημιαγωγοί μπορεί να υποδιαιρεθεί σε 4 βασικά στάδια: την κατασκευή ηλεκτρονικών πλακιδίων (*wafer fabrication ή wafer fab*), τον έλεγχο/εξέταση των ηλεκτρονικών πλακιδίων (*wafer probe*), τη συγκέντρωση/ενσωμάτωση (*assembly/packaging*) και το τελικό τεστ (*final testing*), τα οποία απεικονίζονται και στο Σχήμα 2-1.

Σε ορισμένες περιπτώσεις γίνεται λόγος και για 6 στάδια, θεωρώντας ως πρώτο στάδιο, πριν την κατασκευή ηλεκτρονικών πλακιδίων, την κατασκευή των υλικών (*material fabrication ή material fab*) και κατηγοριοποιώντας το τελικό τεστ σε 2 υποκατηγορίες τις λεγόμενες *raw test* και *final test*. Ωστόσο, θα μείνουμε στην περιγραφή των 4 σταδίων που αναφέρθηκαν αρχικά, δεδομένου ότι αυτά είναι τα επικρατέστερα.



Σχήμα 2-1: Στάδια της βιομηχανίας ημιαγωγών

- Κατασκευή ηλεκτρονικών πλακιδίων (wafer fab)

Η κατασκευή ηλεκτρονικών πλακιδίων αποτελεί την πιο πολύπλοκη τεχνολογικά φάση/στάδιο σε σύγκριση με τα υπόλοιπα, το οποίο χαρακτηρίζεται κιάλας ως μεγαλύτερης έντασης κεφαλαίου. Πρόκειται για την επεξεργασία ακατέργαστων πλακιδίων από πυρίτιο ή αρσενικούχο γάλλιο, ώστε να σχηματιστούν στρώσεις και νόρμες από μέταλλο και το υλικό του πλακιδίου και τελικά να παραχθεί το απαιτούμενο κύκλωμα. Εν τέλει, μέχρι και μερικές χιλιάδες πανομοιότυπων ημιαγωγικών τσιπ (πολύ μικρής κλίμακας ενσωματωμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα ή integrated electronic circuits-IC), στοιβαγμένα σε στρώσεις σύμφωνα με τη διαδικασία, μπορεί να απαρτίζουν ένα πλακίδιο. Ο αριθμός των επιμέρους λειτουργιών μπορεί να είναι εκατοντάδες για ένα πολύπλοκο εξάρτημα, όπως είναι οι μικροεπεξεργαστές. Πολλές από αυτές τις λειτουργίες είναι αναγκαίο να πραγματοποιούνται σε καθαρό, μη επηρεασμένο από εξωτερικούς παράγοντες περιβάλλον, προκειμένου να αποφευχθεί τυχόν σωματιδιακή μόλυνση των πλακιδίων. Αυτή είναι η λεγόμενη κατασκευή ηλεκτρονικών πλακιδίων ή αλλιώς wafer fabrication.

Το προϊόν μετακινείται μέσα στον εκάστοτε χώρο παραγωγής ή εργοστάσιο σε παρτίδες, συνήθως σταθερού μεγέθους μέσω κοντέινερ ειδικά για τη μεταφορά πλακιδίων. Σε συγκεκριμένα βήματα της διαδικασίας παραγωγής, είναι δυνατόν ορισμένα πλακίδια να υποστούν ζημιά κατά τον τρόπο με τον οποίο έχουν επεξεργαστεί. Σε κάποιες περιπτώσεις η επανεπεξεργασία (rework) είναι μια λύση, για να επιδιορθωθεί το πλακίδιο. Όταν όμως δεν επιτρέπεται για κάποιο λόγο η επανεπεξεργασία, τα ελαττωματικά πλέον πλακίδια αποκαλούνται αχρηστευμένο υλικό (scrapped material).

- Έλεγχος/Εξέταση των ηλεκτρονικών πλακιδίων (wafer probe)

Έπειτα από την κατασκευή των ηλεκτρονικών πλακιδίων (wafers), αυτά εισέρχονται στη φάση του ελέγχου. Εκεί τα μεμονωμένα πλέον κυκλώματα ελέγχονται «ηλεκτρονικά» από μικροανιχνευτές (thin probes), οι οποίοι συνδέονται σε κάθε ενσωματωμένο κύκλωμα και αποφασίζουν αν είναι λειτουργικά ή όχι. Τα κυκλώματα που δεν καταφέρνουν να περάσουν τον έλεγχο, γιατί δεν πληρούν τις προδιαγραφές, στιγματίζονται. Τα πλακίδια μετά τεμαχίζονται σε μεμονωμένα κυκλώματα και τα ελαττωματικά απορρίπτονται.

- Συγκέντρωση/ενσωμάτωση (assembly/packaging)

Στο προηγούμενο στάδιο (wafer probe) εντοπίζονται τα μη ελαττωματικά ενσωματωμένα κυκλώματα (ICs) και φτιάχνεται ένα ηλεκτρονικό πλάνο του κάθε πλακιδίου, έτσι ώστε μόνο τα μη ελαττωματικά ICs να τοποθετηθούν σε ένα πακέτο στο επόμενο στάδιο, το οποίο ονομάζεται στάδιο της συγκέντρωσης ή της ενσωμάτωσης (assembly/packaging). Στη φάση αυτή, τα κυκλώματα τοποθετούνται σε πλαστικά ή κεραμικά πακέτα (ανάλογα με τη μελλοντική χρήση τους), τα οποία προσδίδουν κατάλληλη προστασία από το περιβάλλον, ενώ υπάρχουν και αμόλυβδοι φορείς μικροτσίπ. Στην κύρια περιοχή αυτής της φάσης, γίνονται ποικίλες λειτουργίες, όπως πριόνισμα των πλακετών, δέσιμο με σύρμα και οπτική επιθεώρηση. Το πακετάρισμα, το καλούπιασμα, το σφράγισμα και ο περιβαλλοντικός έλεγχος είναι δυνατόν να διεξαχθούν και σε περιοχές με λιγότερο καλές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Μια δυσκολία, όσον αφορά σε αυτές τις λειτουργίες, αποτελεί το γεγονός ότι κάθε εργασία (π.χ. παρτίδα), συχνά υποδιαιρείται σε επιμέρους υποεργασίες, καθεμία από τις οποίες μπορεί να απαιτεί πέρασμα από διάφορες μηχανές μέχρι να ολοκληρωθεί μια συγκεκριμένη λειτουργία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, μια εργασία να πρέπει να περάσει από πολλές μηχανές και αυτό να κοστίζει πολύ σε χρόνο. Μια επιπλέον δυσκολία στη φάση του assembly, είναι η ανάγκη για συχνά setup ανάμεσα στην επεξεργασία διαφορετικών ειδών προϊόντων, γεγονός που καθυστερεί περαιτέρω την παραγωγική διαδικασία. Τέλος, ένας ακόμη περιορισμός, είναι ότι το προϊόν που θα γίνει ένα wafer εξαρτάται από την απόδοση του σε κάποια τεστ επιδόσεων (π.χ. τεστ ταχύτητας), κάτι που σημαίνει ότι δε θα γίνει απαραίτητα το προϊόν που αρχικά προοριζόταν. Η διαδικασία αυτή καλείται «binning».

Από τη στιγμή που για κάθε κύκλωμα υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να «πακεταριστεί», υπάρχει ένας πολλαπλασιασμός των ειδών προϊόντων σε αυτή τη φάση. Αφού το εκάστοτε πακέτο σφραγιστεί και ελεγχθεί πως δεν φέρει τρύπες ή άλλα ελαττώματα, το προϊόν είναι έτοιμο να προχωρήσει στο τελευταίο στάδιο του τελικού τεστ.

- Τελικό τεστ (final testing)

Τα «πακεταρισμένα» ενσωματωμένα κυκλώματα (ICs) από το προηγούμενο στάδιο περνάνε μια σειρά από τεστ, για να διαβεβαιωθεί ότι μόνο πλήρως λειτουργικά ICs φτάνουν στον πελάτη (καλύπτουν συγκεκριμένες προδιαγραφές). Συγκεκριμένα, υποβάλλονται σε εκτεταμένα δοκιμαστικά ηλεκτρικά τεστ και τεστ θερμικής καταπόνησης (heat-stress test) σε ειδικούς φούρνους (burn-in ovens).

Όσον αφορά στη burn-in λειτουργία, στόχος της είναι τεστάρει τα IC, όπως τους μικροεπεξεργαστές και αποτελεί αναπόσπαστο στάδιο της βιομηχανίας ημιαγωγών. Εξαιτίας των ποικίλων διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στο πλαίσιο της βιομηχανίας αυτής, είναι λογικό ορισμένα μικροτσίπ, που βγαίνουν από τα προηγούμενα στάδια της παραγωγής, να είναι «εύθραυστα» και να χαλάσουν σε ένα πολύ σύντομο χρονικό διάστημα από την αρχή της λειτουργίας τους. Είναι, επομένως, αναγκαίο αυτές οι συσκευές να ανιχνευθούν και να απορριφθούν. Αυτή ακριβώς η διαδικασία ανίχνευσης των συγκεκριμένων συσκευών ονομάζεται *burn-in* και περιλαμβάνει την καταπόνηση του κομματιών με στόχο να φανερωθούν τα αδύναμα ή ελαττωματικά. Οι συσκευές καταπονούνται ηλεκτρικά και θερμικά με το να τοποθετούνται στους ειδικούς φούρνους που αναφέραμε προηγουμένως και να καλούνται να αντέξουν σε μια θερμοκρασία 150 °C και τάσεις ακόμη και 1.5 φορά μεγαλύτερη από τις συνήθεις τάσεις λειτουργίας τους, με το χρόνο υποβολής να ποικίλει από λίγες ώρες μέχρι και 2 μέρες.

Κάθε IC τσιπ έχει έναν προκαθορισμένο burn-in χρόνο, ο οποίος εξαρτάται από τον τύπο αλλά και τις απαιτήσεις του πελάτη. Καταφθάνουν στην περιοχή για burn-in σε παρτίδες αποτελούμενες από έναν αριθμό IC τσιπ του ιδίου τύπου προϊόντος. Έπειτα, φορτώνονται πάνω σε ειδικές σανίδες, παρτίδες συνήθως ιδίου τύπου και τοποθετούνται μέσα στους φούρνους. Τυπικά, η χωρητικότητα ενός φούρνου οριοθετείται από τον αριθμό των σανίδων που μπορεί να επεξεργαστεί ταυτόχρονα. Από τη στιγμή που τα IC τσιπ είναι δυνατόν να μείνουν στο φούρνο και για

περισσότερο από τον ελάχιστο απαιτούμενο burn-in χρόνο τους, γίνεται να τοποθετηθούν διαφορετικού τύπου προϊόντα σε ένα φούρνο ταυτόχρονα. Ο χρόνος επεξεργασίας, επομένως, ταυτίζεται με το «μέγιστο ελάχιστο απαιτούμενο χρόνο» της παρτίδας του συνόλου των προϊόντων που επεξεργάζεται ταυτόχρονα ο φούρνος. Καταλαβαίνει κανείς λοιπόν, τη σημασία που έχει ο σωστός προγραμματισμός της συγκεκριμένης λειτουργίας, η οποία είναι συνήθως και η πιο αργή (bottleneck) σε σύγκριση με τις υπόλοιπες λειτουργίες της βιομηχανίας ημιαγωγών και, επιπλέον, επειδή βρίσκεται στο τέλος της παραγωγικής διαδικασίας, παρουσιάζει σημαντική επίδραση στις ημερομηνίες αποστολής.

Στο τέλος όλων αυτών των βημάτων, τα IC που πέρασαν όλα τα τεστ πακετάρονται μέσα σε σωλήνες και παραδίδονται στους πελάτες.

Η φάση των τεστ συνδέεται ωστόσο, με μια σειρά από δυσεπίλυτα προβλήματα. Αρχικά, η αλληλουχία των τεστ και των χρόνων που διαρκούν δεν είναι πάντα σταθερή, όπως για παράδειγμα τους burn-in φούρνους που εξηγήσαμε λίγο πιο πάνω. Κατά δεύτερον, υπάρχουν 2 μεγάλοι τύποι εξοπλισμού που χρησιμοποιούνται στα τεστ, τα ίδια τα μηχανήματα που πραγματοποιούν τα τεστ (*testers*) και οι μηχανισμοί φορτω-εκφόρτωσης (*handlers*). Οι αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε αυτούς τους 2 τύπους μπορεί να είναι εξαιρετικά πολύπλοκοι.

Ολόκληρη η παραγωγική διαδικασία για την παραγωγή ενός τσιπ είναι δυνατό να διαρκέσει ακόμη και 3 μήνες.

2.2.2 *Front-end/Back-end*

Οι πρώτες 2 φάσεις (wafer fab και wafer probe) γενικότερα αναφέρονται ως «front-end» λειτουργίες. Οι ακόλουθες φάσεις (assembly και final test) αναφέρονται ως back-end. Στις back-end λειτουργίες οι παρτίδες μπορεί να ποικίλουν από μερικές μεμονωμένες έως και χιλιάδες. Οι front-end λειτουργίες συνήθως πραγματοποιούνται σε βιομηχανικά αναπτυγμένες χώρες, ενώ οι back-end τείνουν να διεξάγονται σε χώρες με φθινό εργατικό δυναμικό.

2.3 Το στάδιο κατασκευής ηλεκτρονικών πλακιδίων

Η κατασκευή ημιαγωγικών συσκευών (semiconductor device fabrication) είναι η διαδικασία, με την οποία παράγονται τα ενσωματωμένα κυκλώματα (integrated circuits) που φυσικά υπάρχουν σε κάθε ηλεκτρική και ηλεκτρονική συσκευή της

καθημερινότητάς μας. Αποτελεί μια διαδικασία πολλαπλών βημάτων φωτογραφικής και χημικής επεξεργασίας, κατά τη διάρκεια της οποίας δημιουργούνται ηλεκτρονικά κυκλώματα βαθμιαία πάνω σε ένα πλακίδιο (wafer), το οποίο είναι κατασκευασμένο από καθαρό ημιαγώγιμο υλικό. Το πυρίτιο είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο ημιαγώγιμο υλικό τη σήμερον ημέρα.

Το σύνολο της κατασκευαστικής διαδικασίας από το ξεκίνημα μέχρι και τα πακεταρισμένα μικροτσίπ που είναι έτοιμα για σφράγιση είναι δυνατόν να διαρκέσει 6 με 8 εβδομάδες και διεξάγεται σε ειδικές εγκαταστάσεις που ονομάζονται wafer fabs.

Μια ογκώδης εγκατάσταση κατασκευής ημιαγωγών (semiconductor wafer fabrication facility) αποτελείται από μερικές εκατοντάδες μηχανές, οργανωμένες σε διακριτά γκρουπ μηχανών (tool groups). Συστάδες ηλεκτρονικών πλακιδίων, που συχνά στο χώρο της συγκεκριμένης βιομηχανίας καλούνται εργασίες (jobs), μετακινούνται διαρκώς από ένα γκρουπ μηχανών σε κάποιο άλλο, υφιστάμενες εκατοντάδες επεξεργασίες μέχρι την τελική τους μορφή. Κάθε εργασία ακολουθεί και μια αλληλουχία διαδικασιών, η οποία αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη οικογένεια προϊόντων (product family) που ανήκει η εργασία αυτή. Στην ουσία, πολλές εκατοντάδες εργασίες που ανήκουν σε διαφορετικές οικογένειες προϊόντων, κυκλοφορούν κάθε στιγμή μέσα στο εργοστάσιο.

Η κατασκευή ημιαγωγών αποτελεί την πιο δαπανηρή σε κόστος και χρόνο φάση από όλες τις φάσεις της βιομηχανίας ημιαγωγών. Πιο ειδικά, το κόστος κατασκευής μιας νέας εγκατάστασης παραγωγής ημιαγωγών (wafer fab) ανέρχεται περίπου στα 4 δισεκατομμύρια δολάρια, ενώ όπως αναφέραμε και προηγουμένως, ένα ηλεκτρονικό πλακίδιο πυριτίου (silicon wafer) που περιέχει ενσωματωμένα κυκλώματα (ICs), χρειάζεται περίπου 4 με 6 εβδομάδες για να ετοιμαστεί. Από τη στιγμή που οι πελάτες πλέον έχουν διάφορες επιλογές, σχετικά με το ποιον θα επιλέξουν να κατασκευάσει το προϊόν που επιθυμούν, οι κατασκευαστές ημιαγωγών έχουν επικεντρώσει τις προσπάθειές τους να παρέχουν υψηλής ποιότητας προϊόντα, εγκαίρως και σε προσιτή τιμή.

2.3.1 Είδη των wafer fabs

Υπάρχει ένας αριθμός από διαφορετικούς τύπους εγκαταστάσεων παραγωγής ημιαγωγών (wafer fabs) τη σήμερον ημέρα, συμπεριλαμβανομένου και αυτών που παράγουν ICs γενικής κατανάλωσης (όπως π.χ. για μικροεπεξεργαστές) και εκείνων

που παράγουν ICs με πιο προσανατολισμένη χρήση (τα λεγόμενα ASICs) για μια ευρεία γκάμα πελατών. Στην πρώτη περίπτωση των wafer fab, συνήθως παράγονται μεγάλες ποσότητες λίγων τύπων προϊόντων (high-volume manufacturing), ενώ τα ASIC wafer fabs κατασκευάζεται μικρότερος όγκος πολλών ωστόσο διαφορετικών ειδών προϊόντων (ASIC manufacturing).

Μια άλλη κατηγορία διάκρισης των wafer fab εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από τον αριθμό των διαφορετικών παραγόμενων προϊόντων ή την ποικιλία προϊόντων. Έτσι έχουμε τα χαμηλής μίξης εργοστάσια (low-mix fabs) και τα υψηλής (high-mix fabs). Στα low-mix fabs, ουσιαστικά οι μηχανές «αφιερώνονται» σε προϊόντα, ενώ στα high-mix η ίδια μηχανή μπορεί να μοιράζεται ανάμεσα σε διάφορα προϊόντα ποικίλων τεχνολογιών, κάτι που σημαίνει πως συναντάμε διαφορετικούς χρόνους «σεταρίσματος» και επεξεργασίας (setup and processing times).

2.3.2 Χειριστές, Αξιοπιστία και Συντήρηση μηχανών

Οι χειριστές (operators) ως ειδικευμένο ανθρώπινο δυναμικό, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη σωστή ροή και λειτουργία ενός wafer fab. Ακόμη και στα πιο αυτοματοποιημένα εργοστάσια, οι άνθρωποι φορτώνουν και ξεφορτώνουν τα ηλεκτρονικά πλακίδια στις μηχανές, χειρίζονται τις μηχανές και εκτελούν ενδιάμεσα βήματα. Συχνά, ανατίθεται σε άρτια καταρτισμένους και πεπειραμένους χειριστές η επίβλεψη των διαφόρων περιοχών παραγωγής. Γενικότερα, διάφοροι άνθρωποι είναι υπεύθυνοι για τη λειτουργία των χώρων εργασίας και μάλιστα είναι δυνατό να ξοδεύουν τον περισσότερο χρόνο τους εκτός του χώρου του εργοστασίου κατά αυτήν τους την ασχολία.

Παραδοσιακά, η αξιοπιστία του εξοπλισμού (*equipment reliability*) στα wafer fabs αποτελεί μείζον ζήτημα. Η συνεχής τάση για μείωση του μεγέθους των ICs, έχει οδηγήσει στο προσκήνιο μηχανές με καινοτόμους τρόπους επεξεργασίας, οι οποίες ωστόσο δημιουργηθεί από κατασκευαστές, που δεν έχουν και μεγάλη εμπειρία στην ανάπτυξη κατασκευαστικού εξοπλισμού. Η αστοχία του εξοπλισμού (*failure of equipment*) ή των διαδικασιών, συχνά δεν είναι κάποια αστοχία υπό την έννοια σπασίματος, αλλά μια ανεπαίσθητη βλάβη που οδηγεί τη μηχανή να παράγει προϊόντα εκτός των περιοχών ανοχής (*tolerance region*). Εξαιτίας όμως της φύσης του προϊόντος και της διαδικασίας, είναι πιθανό κανείς να μην εντοπίσει αυτή τη βλάβη για κάποιο διάστημα. Για αυτό το λόγο, προστίθενται πολλά ενδιάμεσα στάδια ελέγχου στην

παραγωγική διαδικασία. Ακόμη και ένα μεγάλο διάστημα να μείνουν ορισμένες μηχανές κατασκευής ημιαγωγών εκτός λειτουργίας, όπως για παράδειγμα οι «εμφυτευτές» ιόντων (ion implanters) να μείνουν ένα 30-40% εκτός λειτουργίας, μπορεί να έχει μεγάλη επίδραση στη λειτουργία ελέγχου της παραγωγής. Οι τυχαίες μακροχρόνιες βλάβες που μπορεί να συμβούν έχουν ως αποτέλεσμα τη μεγάλη μεταβλητότητα στο χρόνο που κάθε εργασία σπαταλά σε μια διαδικασία. Κατά συνέπεια, μεγάλες μεταβλητότητες στον κύκλο χρόνου (cycle time: ο χρόνος που ξοδεύει μια παρτίδα προκειμένου να δεχτεί μια επεξεργασία) εμποδίζουν την ακριβή πρόβλεψή του, κάτι που οδηγεί σε καθυστέρηση των χρόνων αποστολής στους πελάτες.

Η προληπτική συντήρηση (preventive maintenance) χρησιμοποιείται για να μειώσει τον αριθμό και τη διάρκεια των βλαβών των μηχανών. Μπορεί να απαιτεί και αυτή κάποιο χρόνο για να γίνει, παρόλα αυτά στην ουσία εξοικονομείται χρόνος, διότι με την προληπτική συντήρηση είναι δυνατό να αποφευχθούν αρκετές επικείμενες βλάβες, που θα καθυστερήσουν στην ουσία περισσότερο την παραγωγή.

2.4 Περιοχές του Wafer Fab

Επικεντρωνόμαστε στο πρώτο στάδιο παραγωγής των ημιαγωγών (wafer fab), καθώς αποτελεί μια ξεχωριστή φάση στην παραγωγή, μιας και εκεί δημιουργείται το προϊόν που βρίσκεται στο επίκεντρο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Το wafer fab χαρακτηρίζεται από ορισμένες επιμέρους εργασίες/λειτουργίες, οι οποίες οριοθετούν συγκεκριμένες περιοχές σε αυτό και παρουσιάζονται παρακάτω.

1. Οξείδωση/Εναπόθεση/Διάχυση (Oxidation/Deposition/Diffusion)

Μια στρώση υλικού δημιουργείται ή εναποτίθεται στην επιφάνεια ενός καθαρού πλακιδίου. Η οξείδωση στοχεύει στην ανάπτυξη μιας στρώσης διοξειδίου επάνω στο πλακίδιο. Μέσω της εναπόθεσης εναποτίθενται φιλμ πάνω στα πλακίδια. Τα αντίστοιχα βήματα εναποθέτουν διηλεκτρικές ή μεταλλικές στρώσεις. Είναι δυνατό να υπάρξουν μια ντουζίνα ή και περισσότερες εναποθέσεις πάνω σε ένα αναπτυγμένο κύκλωμα. Η εναπόθεση διεξάγεται με διάφορες διαδικασίες που είναι γνωστές ως Physical Vapor Deposition (PVD), Chemical Vapor Deposition (CVD), Epitaxy, Metalization. Η διάχυση είναι μια διαδικασία που λαμβάνει χώρα σε μεγάλη θερμοκρασία και διασκορπίζει υλικό πάνω στην επιφάνεια του πλακιδίου. Συνήθως, μόνο μια από τις 3 λειτουργίες χρησιμοποιούνται ανά στρώση.

Αναλύοντας λίγο περισσότερο τη λειτουργία της διάχυσης (diffusion), σε αυτήν τοποθετούνται ένας αριθμός πλακιδίων μέσα σε έναν κυλινδρικό αντιδραστήρα, ο οποίος στη συνέχεια σφραγίζεται, θερμαίνεται και πληρώνεται με ειδικό αέριο, το οποίο επιτρέπει στα προστιθέμενα ηλεκτρόνια που βρίσκονται μέσα στο αέριο, να διαχέονται μέσα στην εκτεθειμένη στρώση των πλακιδίων. Με αυτόν τον τρόπο μεταβάλλονται τα ηλεκτρικά και χημικά τους χαρακτηριστικά. Τα πλακίδια επεξεργάζονται σε παρτίδες και ο αντιδραστήρας μπορεί να φιλοξενήσει από 6 μέχρι 12 παρτίδες. Από τη στιγμή που ξεκινά η επεξεργασία ενός συνόλου παρτίδων, δεν επιτρέπεται η έξοδος ή η είσοδος περαιτέρω παρτίδων. Εξαιτίας της χημικής φύσης της διαδικασίας, είναι αδύνατο να γίνει ταυτόχρονη επεξεργασία παρτίδων με διαφορετικό απαιτούμενο χρόνο επεξεργασίας, δηλαδή παρτίδων που ανήκουν σε διαφορετική οικογένεια (job family). Γίνεται επομένως κατανοητός πόσο σημαντικός είναι ο αποτελεσματικός προγραμματισμός αυτών των λειτουργιών (η διαδικασία διαρκεί χοντρικά 10 ώρες, τη στιγμή που οι περισσότερες από τις υπόλοιπες επεξεργασίες στο wafer fab διαρκούν 1 ή 2 ώρες).

Είναι σημαντικό επίσης να τονιστεί ότι πριν τα πλακίδια εισέλθουν στην περιοχή που γίνονται οι προαναφερθείσες εργασίες, πραγματοποιείται καθαρισμός τους. Ακόμη, αρκετοί έλεγχοι και μετρήσεις παρεμβάλλονται μεταξύ των διαδικασιών για την ομαλή ροή τους.

2. Φωτολιθογραφία (Photolithography)

Η επίστρωση (coating), η έκθεση (exposure), η ανάπτυξη (developing) και ο έλεγχος της διαδικασίας (process control) είναι τα κύρια βήματα της διαδικασίας της φωτολιθογραφίας. Στο πρώτο βήμα, το πλακίδιο επενδύεται με ένα λεπτό φιλμ από φωτο-ευαίσθητο πολυμερές που ονομάζεται φωτο-αντιστεκόμενη λωρίδα (photoresist strip). Παράγονται μοτίβα στην επιφάνεια του πλακιδίου όταν ένα IC μοτίβο μεταφέρεται από μια φωτογραφική μάσκα (photo mask) σε ένα φωτο-ευαίσθητο πολυμερές, το οποίο αντιγράφει το μοτίβο στις υποκείμενες στρώσεις. Οι μηχανές της έκθεσης (steppers), μετατρέπουν το μοτίβο πάνω στο πλακίδιο προβάλλοντας φως μέσα από τη φωτογραφική μάσκα (reticle), ώστε να εκθέσουν το πλακίδιο χρησιμοποιώντας υπεριώδες φως. Το εκτιθέμενο πλακίδιο μετά αναπτύσσεται απομακρύνοντας τα πολυμερή μέρη του φωτο-αντιστεκόμενου από το πλακίδιο. Κάθε πλακίδιο περνά μέσα από την περιοχή της φωτολιθογραφίας μέχρι και 40 φορές εξαιτίας των διαφορετικών στρώσεων. Η συγκεκριμένη περιοχή του wafer fab μάλιστα

αποτελεί την πιο αργή σε σχέση με τις άλλες (bottleneck), επειδή οι μηχανές της έκθεσης είναι πολύ ακριβές.

3. Χάραξη (Etch)

Αυτό το βήμα είναι υπεύθυνο για την απομάκρυνση υλικού από την επιφάνεια του πλακιδίου. Τα πλακίδια καλύπτονται μερικώς από τη φωτο-αντιστεκόμενη λωρίδα (photoresist strip) μετά τη φωτολιθογραφία. Περιοχές του πλακιδίου οι οποίες δεν καλύπτονται, απομακρύνονται. Εδώ οφείλουμε να τονίσουμε ότι υπάρχει η υγρή χάραξη (wet etching) και η στεγνή χάραξη (dry etching), αναλόγως με το μέσο που χρησιμοποιείται (στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιούνται αέρια).

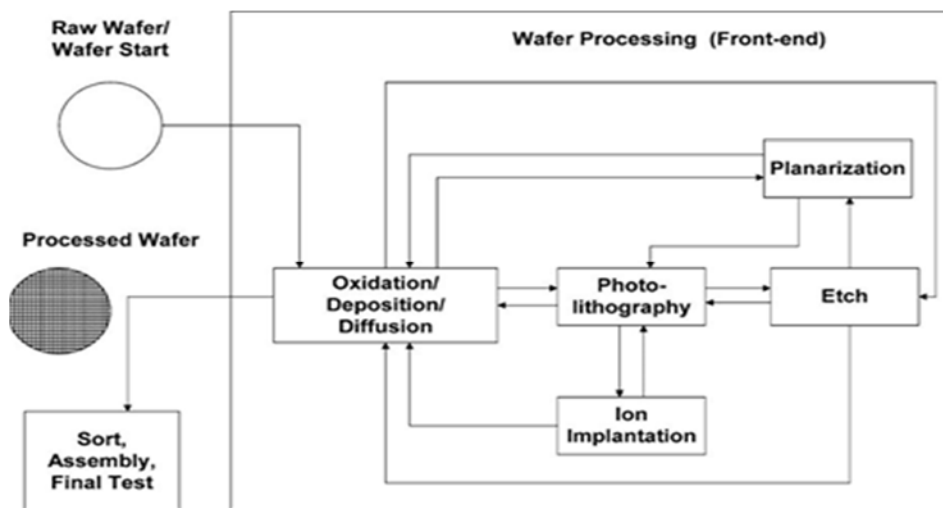
4. Εμφύτευση ιόντων (Ion implantation)

Προσθετικά ιόντα (dopant ions) επικάθονται επιλεκτικά στην επιφάνεια του πλακιδίου. Το προσθετικό υλικό επικάθεται στα κομμάτια του πλακιδίου που έχουν προηγουμένως χαραχτεί.

5. Λείανση (Planarization)

Στο βήμα αυτό καθαρίζεται και γίνεται επίπεδη η επιφάνεια του πλακιδίου. Ονομάζεται αλλιώς χημική-μηχανική στίλβωση (Chemical-Mechanical Polishing ή CMP). Μέσω κατάλληλης χημικής προσβολής η επιφάνεια λειαίνεται. Αυτό οδηγεί στην ελαχιστοποίηση του πάχους του πλακιδίου πριν προστεθεί καινούρια στρώση.

Όλες αυτές οι λειτουργίες γενικά αποτελούν πάνω από το 75% του συνολικού κύκλου χρόνου (total cycle time), ενώ αποτελούν και τη μεγαλύτερη συνιστώσα του κόστους. Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζονται οι προαναφερθείσες περιοχές του wafer fab και η ροή της παραγωγής.



Σχήμα 2.1 Κύριες περιοχές παραγωγής σε ένα wafer fab

2.5 Μέτρα απόδοσης

Ιδιαίτερη σημασία έχουν για τη βιομηχανία των ημιαγωγών, όπως και για κάθε βιομηχανία, τα μέτρα απόδοσης (performance measures), δηλαδή ποσοτικές ενδείξεις, οι οποίες μας βοηθούν να εκτιμήσουμε την οργάνωση και την αποδοτικότητα της βιομηχανίας ή γενικότερα μιας επιχείρησης.

Τα συχνότερα είδη μέτρων απόδοσης που συναντά κανείς στη βιομηχανία ημιαγωγών είναι ο μέσος χρόνος κύκλου (cycle time), ο μέσος αριθμός προϊόντων στις μηχανές (work-in-process ή WIP), τα προϊόντα που ετοιμάζονται στη μονάδα του χρόνου (throughput) και ο βαθμός χρησιμοποίησης των μηχανών (tool utilization).

Ο βαθμός χρησιμοποίησης των μηχανών (tool or machine utilization) είναι πολύ σημαντικός από τη στιγμή που οι μηχανές αποτελούν περίπου το 70% του κόστους σε ένα νέο wafer fab. Όσον αφορά στο χρόνο κύκλου (cycle time), αυτός, όπως έχουμε τονίσει και παραπάνω, ορίζεται ως ο απαιτούμενος χρόνος που ξοδεύει μια παρτίδα πλακιδίων (εργασία ή job) μέσα στο σύστημα παραγωγής ημιαγωγών, συμπεριλαμβάνοντας το χρόνο που περιμένει στην ουρά (queue time), το χρόνο επεξεργασίας (processing time) και το χρόνο μεταφοράς (transit time).

Βασικές στρατηγικές της βιομηχανίας ημιαγωγών (manufacturing strategies in the semiconductor industry) είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής (production cost) και η αύξηση της παραγωγικότητας (productivity), με ταυτόχρονη βελτίωση της ποιότητας (quality) και του χρόνου αποστολής (delivery time). Σημαντικοί παράγοντες που επιδρούν στα κόστη είναι η απόδοση της παραγωγής, η

εργασία, τα υλικά, τα αποθέματα εμπορευμάτων (inventory), ο εξοπλισμός και οι αποσβέσεις των εγκαταστάσεων. Μία καλή στρατηγική είναι να κρατούν κάποιο απόθεμα μεταξύ των τμημάτων «front-end» και «back-end» οι βιομηχανίες, με στόχο να «απορροφούν» ομαλότερα τις διακυμάνσεις στην εξωτερική ζήτηση. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή αυτής της στρατηγικής είναι η διατήρηση υψηλού throughput και βαθμού χρησιμοποίησης του εξοπλισμού, με ταυτόχρονη μείωση του μέσου cycle time και της διασποράς του.

Τα μέτρα απόδοσης σε μια βιομηχανία αποτελούν επομένως, απαραίτητο μέρος για την κατανόηση της παραγωγικής ικανότητάς της, την πρόβλεψη των μελλοντικών αναγκών και τον εντοπισμό ευκαιριών για τυχόν βελτιώσεις. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό το γεγονός ότι για να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή απόδοση του συστήματος, απαιτείται η μελέτη αυτών των μέτρων και με βάση αυτήν, να γίνει ο κατάλληλος προγραμματισμός.

2.6 Κρίσιμοι παράγοντες και σύγχρονες προκλήσεις

Όπως έχει γίνει ήδη κατανοητό, η βιομηχανία των ημιαγωγών πρόκειται για μια εξαιρετικά πολύπλοκη βιομηχανία και η οργάνωση και ο προγραμματισμός της μόνο εύκολη υπόθεση δε μπορεί να θεωρηθεί. Υπάρχουν μια σειρά από παράγοντες που συνδράμουν σε αυτό το γεγονός, κάποιοι από τους οποίους παρουσιάζονται παρακάτω.

- 1. Πολύπλοκες ροές προϊόντων (Complex Product Flows):** Ο αριθμός των βημάτων της διαδικασίας είναι υψηλός και ένα μέρος από αυτά λαμβάνουν χώρα σε κοινό εξοπλισμό. Για παράδειγμα, ένα πλακίδιο μπορεί να χρειαστεί να επισκεφτεί τη φωτολιθογραφία 8 ή και 9 φορές μέχρι να κατασκευαστούν όλες οι στρώσεις του κυκλώματος. Τέτοιες ροές προϊόντων, κατά τις οποίες μια παρτίδα επισκέπτεται κάποιον εξοπλισμό περισσότερες από μία φορές, ονομάζονται «επανεισερχόμενες» ροές προϊόντων (reentrant product flows).
- 2. Τυχαίες αποδόσεις παραγωγής (Random Yields):** Οι αποδόσεις των διαδικασιών είναι αβέβαιες και ποικίλουν εξαιτίας περιβαλλοντολογικών συνθηκών και προβλημάτων με τον εξοπλισμό της παραγωγής και των υλικών. Επίσης, στο στάδιο των τεστ, υπάρχει πάντα το ενδεχόμενο ένα προϊόν να επανεπεξεργαστεί όπως αναφέραμε πιο πάνω. Οι αποδόσεις παραγωγής γενικά, είναι δυνατόν να προβλεφθούν για τα περισσότερα εδραιωμένα προϊόντα, χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα, αλλά με τη συνεχή δημιουργία νέων

προϊόντων και τεχνολογιών, ο υπολογισμός των αποδόσεων καθίσταται ένα μεγάλο πρόβλημα.

3. Ποικίλα χαρακτηριστικά εξοπλισμού (Diverse Equipment Characteristics):

Τα χαρακτηριστικά του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία ημιαγωγών ποικίλουν αισθητά. Κάποιες μηχανές απαιτούν χρονικά ακανόνιστα «σεταρίσματα» (setup times), ενώ άλλες όχι. Κάποια κέντρα παραγωγής, όπως η χάραξη (etching) και το burn-in, αποτελούνται από μηχανές που επεξεργάζονται τις διάφορες παρτίδες ανά σύνολο (batch processing machines). Υπάρχουν επίσης και συγκεκριμένοι χρονικοί περιορισμοί σε διάφορες διαδικασίες, όπως μεταξύ του burn-in και του τεστ, όπου μια παρτίδα οφείλει να ελεγχθεί μέσα σε 96 ώρες αφού εγκαταλείψει το στάδιο του burn-in ή να επαναληφθεί όλη η διαδικασία.

4. Εξοπλισμός εκτός λειτουργίας (Equipment Downtime):

Ο παραγωγικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία ημιαγωγών χρειάζεται εκτεταμένη προληπτική συντήρηση και βαθμονόμηση, αλλά και πάλι υπόκειται σε απρόβλεπτες βλάβες. Έχει εκτιμηθεί ότι ο κύριος παράγοντας αβεβαιότητας στη βιομηχανία ημιαγωγών, δεν είναι άλλος από αυτές τις απρόβλεπτες βλάβες που θέτουν το εξοπλισμό εκτός λειτουργίας.

5. Παραγωγή και ανάπτυξη σε κοινές δραστηριότητες (Production and Development in Shared Facilities):

Εξαιτίας της συνεχόμενης ανάπτυξης νέων προϊόντων και διαδικασιών, χρησιμοποιείται συχνά ο ίδιος εξοπλισμός για την παραγωγή παρτίδων και για μηχανικά τεστ για την αξιολόγησή τους. Τα αλληλοσυγκρουόμενα συμφέροντα του κατασκευαστικού και του μηχανικού μέρους, συνεισφέρουν στη σύγχυση.

6. Πρόσβαση δεδομένων και συντήρηση (Data Availability and Maintenance):

Ο όγκος των δεδομένων σε μια βιομηχανία ημιαγωγών, καθιστά την απόκτηση τους και τη συντήρηση μια εξαιρετικά επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία.

7. Φύση και διάρκεια λειτουργιών (Nature and Duration of the Operations):

Ένας βασικός παράγοντας είναι οι διαφορετικοί χρόνοι επεξεργασίας των εργασιών μέσα στη βιομηχανία. Ορισμένες είναι δυνατό να απαιτούν 15 λεπτά ή και λιγότερο, τη στιγμή που άλλες μπορεί να φτάσουν μέχρι και τις 12 ώρες. Οι περισσότερες από αυτές (για την ακρίβεια περίπου το 1/3 των συνολικών) είναι συλλογικές επεξεργασίες (batch processors), όπου πολλές παρτίδες επεξεργάζονται ταυτόχρονα. Η μεταβλητότητα που δημιουργείται από αυτές τις

μηχανές, συχνά οδηγεί στο σχηματισμό μεγάλων ουρών μπροστά τους και κατά συνέπεια, μια μη γραμμική ροή των προϊόντων μέσα στο wafer fab.

- 8. Μακροχρόνιες προθεσμίες και υψηλό κόστος αύξησης της χωρητικότητας (Long lead time and high cost of capacity increment):** Ο νέος εξοπλισμός πρέπει να έχει παραγγελθεί αρκετούς μήνες πριν. Η αύξηση της χωρητικότητας ενός υπάρχοντος εργοστασίου μπορεί να διαρκέσει ακόμη και 9 μήνες και να φτάσει και το χρόνο μέχρι να τοποθετηθεί σωστά ο εξοπλισμός. Για ένα νέο εργοστάσιο, μπορεί να κοστίσει το λιγότερο ένα δισεκατομμύριο και να πάρει πάνω από ένα χρόνο για να χτιστεί. Οι σχεδιαστές οφείλουν να αποφασίσουν την επέκταση της χωρητικότητας με βάση τις τρέχουσες προβλέψεις ζήτησης για τον επόμενο ένα ή δύο χρόνια. Ωστόσο, σε ένα ραγδαία εξελισσόμενο περιβάλλον μια τέτοια πρόβλεψη σπάνια είναι ακριβής.

Όσον αφορά τις προκλήσεις, αυτές είναι όπως αναφέρονται παρακάτω:

- A. Κίνδυνος νέων εισακτέων στο χώρο (Threat of New Entrants):** Στις πρώτες μέρες της βιομηχανίας των ημιαγωγών, σχεδιαστές μηχανικοί με έξυπνες ιδέες συχνά άφηναν μια εταιρία για να ξεκινήσουν μια δική τους. Με την ανάπτυξη της βιομηχανίας, ωστόσο, η σύσταση ενός νέου εργοστασίου μικροτσιπ απαιτεί επένδυση δισεκατομμυρίων δολαρίων. Το κόστος εισόδου επομένως στο χώρο είναι δυσβάστακτο για τους περισσότερους, με αποτέλεσμα να μένουν στο προσκήνιο μόνο τα μεγάλα ονόματα. Παρόλα αυτά, υπάρχουν ενδείξεις ότι τα πράγματα μπορεί να αλλάξουν. Οι εταιρίες που ασχολούνται με την παραγωγή ημιαγωγών σήμερα, αρχίζουν να σχηματίζουν «συμμαχίες», με στόχο να μοιράσουν τα κόστη παραγωγής. Υπό αυτό το πρίσμα γίνεται λοιπόν, πιο προσιτή η είσοδος ενός «νέου παίχτη» στον τομέα.
- B. Δύναμη των προμηθευτών (Power of Suppliers):** Για μεγάλες εταιρίες ημιαγωγών, οι προμηθευτές έχουν λίγη δύναμη, αφού η καθεμία έχει εκατοντάδες προμηθευτές. Ωστόσο, με την παραγωγή να καθίσταται βαθμιαία όλο και πιο ακριβή, αρκετοί μικροκατασκευαστές τσιπ γίνονται όλο και σημαντικότεροι.
- C. Δύναμη των αγοραστών (Power of Buyers):** Τα περισσότερα «τμήματα-κλειδιά» των επιχειρήσεων κυριαρχούνται από έναν μικρό αριθμό «παικτών» και άρα οι αγοραστές έχουν περιορισμένη διαπραγματευτική ικανότητα.

- D. Διαθεσιμότητα αντικαταστατών/Ανταγωνισμός (Availability of Substitutes/Competitive Rivalry):** Η απειλή αντικαταστατών στη βιομηχανία ημιαγωγών εξαρτάται από το τμήμα. Ενώ η προστασία πνευματικής ιδιοκτησίας ίσως να αποκρούει την απειλή για κάποιο διάστημα, πάλι σε ένα σύντομο διάστημα εμφανίζονται εταιρίες που παράγουν προϊόντα σε χαμηλότερες τιμές. Μια εταιρεία που ξοδεύει δισεκατομμύρια δολάρια για να παρέχει γρήγορα, αξιόπιστα μικροτσίπ μπορεί να αντιμετωπίσει προβλήματα από μια άλλη εταιρεία, η οποία έχει ως στόχο να αντιγράψει ως ένα βαθμό το προϊόν και να το πουλήσει πολύ φθηνότερα στην αγορά. Υπάρχει λοιπόν πάντοτε η πίεση στους κατασκευαστές τσιπ για νέες, βελτιωμένες και φθηνότερες ιδέες από κάτι που μέχρι λίγους μήνες πριν θεωρούνταν υπερσύγχρονο.
- E. Κόστος εργοστασίου (Factory Cost):** Το κόστος παραγωγικών εγκαταστάσεων ημιαγωγών (9000 m²) αυξάνεται ραγδαία όσο πολυπλοκότεροι γίνονται ο σχεδιασμός και τα κατασκευαστικά πλάνα, καθώς απαιτείται ολοένα και περισσότερος χώρος. Η διαρκής κεφαλαιοποίηση των εργοστασίων και τα λειτουργικά έξοδα, επηρεάζουν την κερδοφορία της βιομηχανίας ημιαγωγών. Σύμφωνα με πληροφορίες μάλιστα, τα κόστη των εργοστασίων αυξάνονται περίπου 20% κάθε χρόνο και τα κόστη υποτίμησης που αναλογούν αντιπροσωπεύουν το 45% του κόστους πλακιδίου/cm². Προκειμένου να μείνουμε στην καμπύλη βελτίωσης, το λειτουργικό κόστος ανά cm² πρέπει να βελτιωθεί κατά 1% το χρόνο.
- F. Ρίσκο διαχείρισης επενδύσεων στο εργοστάσιο και χρονικός παράγοντας (Factory Investment Risk Management and Time Factors):** Η ραγδαία μείωση του επιτρεπόμενου χρόνου ώστε να ανακτήσει το εργοστάσιο τις αρχικές του επενδύσεις απαιτεί να πραγματοποιούνται οι εργασίες γρηγορότερα και με μεγαλύτερη σιγουριά.
- G. Αύξηση ελάχιστης οικονομικής χωρητικότητας (Minimum Economical Capacity Increment):** Τα αποδοτικά και κερδοφόρα εργοστάσια πρόκειται να χωράνε 30-40 χιλιάδες WSM (wafer starts per month) στο κοντινό μέλλον.

Κεφάλαιο 3 Το project ██████████

3.1 Εισαγωγικές έννοιες

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, για την επίτευξη, ως τελικού προϊόντος, ενός ενσωματωμένου κυκλώματος (IC), θα πρέπει να πραγματοποιηθεί συγκεκριμένη αλληλουχία. Μια τέτοια προσπάθεια, έχει ξεκινήσει με την έναρξη ενός προγράμματος που φέρει την ονομασία ██████████

██████████”. Το συγκεκριμένο έργο, στοχεύει στην επίτευξη βελτίωσης στη ψηφιοποίηση της ευρωπαϊκής βιομηχανίας, με τη βοήθεια της ηλεκτρονικής και της τεχνολογίας πληροφοριών και επικοινωνίας. Αποτελεί ένα μεγάλο έργο ανά την Ευρώπη, χρηματοδοτούμενο κυρίως από την Ευρωπαϊκή Ένωση, με τη συμμετοχή πολλών εταιρών εκ των οποίων, ορισμένοι είναι πολύ γνωστές βιομηχανίες. Πέραν όμως των βιομηχανικών εταιρών, συμμετέχοντες είναι και πολλά ευρωπαϊκά πανεπιστήμια, όπως είναι το τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Αξίζει να σημειωθεί, ότι το πρόγραμμα βασίζεται σε τρεις κεντρικούς άξονες: τη ψηφιακή παραγωγή, τα δίκτυα της αλυσίδας εφοδιασμού και τη διαχείριση του κύκλου ζωής των προϊόντων. Για την κάλυψη αυτών των πεδίων, θα πρέπει να εισαχθούν νέες λύσεις στον αυτοματισμό και τα δίκτυα, με παράλληλη βελτίωση της διαφάνειας των δεδομένων, τη συνοχής τους και τη συνολικής τους αποτελεσματικότητας. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να καλυφθούν όλοι οι βιομηχανικοί τομείς, από την αυτοκινητοβιομηχανία έως τη ρομποτική. Το παρόν πρόγραμμα, το οποίο έχει διάρκεια τριών ετών, χωρίζεται σε διαφορετικά πακέτα εργασίας (work packages ή WP), που με τη σειρά τους αλληλοεπιδρούν, παρέχοντας ορισμένα αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, τα πακέτα εργασίας είναι συνολικά 10, εκ των οποίων το τμήμα μας συμβάλλει σε δύο εξ αυτών, στα 4 και 5 (WP4 ,WP5).

Όσον αφορά το work package 4, σκοπός των ασχολούμενων με αυτό, είναι η ανάπτυξη σύνθετων μοντέλων προσομοίωσης, που θα αφορούν τα τρία στοιχεία που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα μοντέλα αυτά, θα πρέπει να συνδέουν ολόκληρο το κύκλο ζωής του προϊόντος και να τον κάνουν πιο ευέλικτο. Για την πραγματοποίηση αυτού, θα δημιουργηθεί ένα μακροπρόθεσμο σύστημα προσομοίωσης. Ως αποτέλεσμα, η βιομηχανία θα μπορεί να αναπτύξει και να αυξήσει τα νέα προϊόντα μέσα σε λίγες μέρες, σε έναν εικονικό κύκλο ζωής προϊόντων, χωρίς να σπαταλάει μεγάλα ποσά και

χρόνο. Τα προϊόντα, θα πρέπει να ενσωματωθούν σε μια ώριμη εφοδιαστική αλυσίδα και θα μπορούν να αναπτυχθούν πιο γρήγορα και πιο αποτελεσματικά. Επίσης, τα προσομοιωτικά αυτά μοντέλα, θα χρησιμοποιηθούν για αναπαράσταση πραγματικών συστημάτων, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις διαστάσεις που εξετάζονται. Η χρησιμοποίησή τους, επεκτείνεται στην αξιολόγηση απόδοσης και στην εκ των προτέρων βελτιστοποίηση οποιασδήποτε αναπαράστασης πραγματικού συστήματος σε λειτουργικές συνθήκες. Επιπλέον, πραγματικά δεδομένα αναμένεται να εισαχθούν στα μοντέλα προσομοίωσης, που σχετίζονται με τις διαδικασίες παραγωγής, την εφοδιαστική αλυσίδα και θα εξαχθούν ορισμένα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα αυτά, θα αξιολογηθούν και θα συνδεθούν με τον πραγματικό κόσμο.

Αναφερόμενοι στο work package 5, σκοπός των συμμετεχόντων στο πρόγραμμα, είναι η δημιουργία λειτουργικών συστημάτων, με τα οποία θα επιτυγχάνεται η μείωση των χρόνων αναμονής των πελατών, των χρόνων παραγωγής, με ταυτόχρονη βελτίωση της συνολικής ποιότητας των προϊόντων. Πιο συγκεκριμένα, θα αναπτυχθούν αναλυτικά μοντέλα δικτύων παραγωγής και δικτύων εφοδιασμού, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για να προαχθεί η ψηφιακή παραγωγή, η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας και του κύκλου ζωής των προϊόντων. Τα προσομοιωτικά μοντέλα, όπως αυτά αναπτύχθηκαν από το WP4, θα συγκρίνονται με τα αναλυτικά στοχαστικά μοντέλα, για τη λήψη των κατάλληλων αποφάσεων.

Όπως γίνεται κατανοητό, τα δύο πακέτα εργασίας αλληλοσυνδέονται, καθώς τα αποτελέσματα του ενός επηρεάζουν σοβαρά το άλλο. Η παρούσα εργασία, συνδέεται περισσότερο με το πέμπτο πακέτο εργασίας, καθώς πραγματεύεται τον κύκλο ζωής των προϊόντων και συγκεκριμένα το χρόνο κύκλου τους.

3.2 Ο ρόλος της [REDACTED]

Στα πλαίσια του WP5, γίνεται ανάλυση του σχεδιασμού και της δομής του φυσικού συστήματος (physical system structure) των διαφόρων βιομηχανικών εταίρων. Από την ανάλυση αυτή, προκύπτουν ορισμένα προβλήματα. Για την επίλυση των προβλημάτων αυτών, αναπτύσσονται νέα εργαλεία σχεδιασμού και βελτιστοποίησης, τόσο από τους επιστημονικούς, όσο και από τους βιομηχανικούς συνεργάτες, τα οποία δοκιμάζονται και εφαρμόζονται σε διάφορες περιπτώσεις. Μεταξύ των βιομηχανικών εταίρων, υπάρχουν πολλές γνωστές βιομηχανίες. Οι βιομηχανίες αυτές, παρουσιάζουν

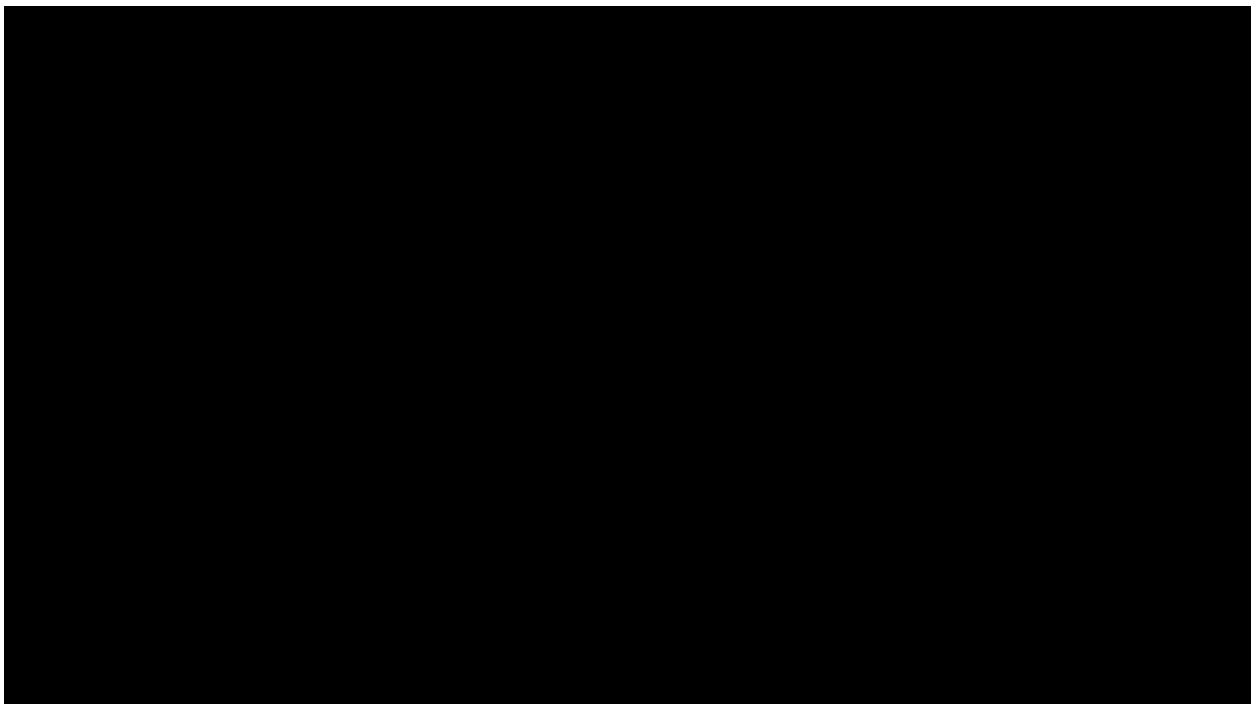
την αλυσίδα εφοδιασμού τους, τη δομή της παραγωγής τους, μαζί με τη δυνατότητα βελτιστοποίησης, που είναι αποτέλεσμα της τρέχουσας δομής τους.

Στην εκπόνηση της εργασίας, ασχολούμαστε με την εφοδιαστική αλυσίδα (supply chain) της ████████ της οποίας ο σκοπός της, είναι να αναπτύξει ένα σύστημα γενικού σχεδιασμού, που να καλύπτει όλες τις μονάδες παραγωγής με μια ολιστική προσέγγιση. Για την περιγραφή της δομής του φυσικού της συστήματος, λήφθηκε υπόψη το εργοστάσιο ημιαγωγών (semiconductor plant), που βρίσκεται στην περιοχή του ████████ στη ████████. Για να περιγραφεί πλήρως η δομή του φυσικού συστήματος, χρειάστηκε να συλλεχθούν τρεις τύποι δεδομένων. Η δομή, πρώτα, περιλαμβάνει την περιγραφή όλων των σχετικών δεδομένων, έτσι ώστε να υπάρχει μια λίστα με όλα τα χαρακτηριστικά, απ' όπου το σύστημα μπορεί να περιγραφεί. Έπειτα, τα δεδομένα όλων των χαρακτηριστικών, πρέπει να εξαχθούν από το σύστημα και να αποθηκευτούν σε μια βάση δεδομένων. Με τα διαθέσιμα αυτά δεδομένα, το κάθε συμμετέχον μέλος του προγράμματος, θα μπορεί να ανοικοδομήσει ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού. Τέλος, θα πρέπει να περιγράφονται όλες οι διαδικασίες σχεδιασμού και ελέγχου, που αφορούν το φυσικό σύστημα.

Για την επίτευξη της λίστας που θα περιλαμβάνει χαρακτηριστικά, του φυσικού συστήματος, έχουν ληφθεί διαφορετικές προσεγγίσεις. Η πρώτη προσέγγιση, έχει να κάνει με την εξέταση των φυσικών συστημάτων και την προσπάθεια απομόνωσής τους. Η δεύτερη αφορά τα δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα, εάν ορισμένες πληροφορίες του συστήματος, αποθηκεύονται σε μια βάση δεδομένων, θα πρέπει να είναι σχετικές με την περιγραφή του συστήματος. Η τελευταία προσέγγιση, εξετάζει τις υπάρχουσες προσεγγίσεις θεωρίας και μοντελοποίησης για την περιγραφή των φυσικών συστημάτων και τις εφαρμόζει σε περιπτώσεις, για να επιβεβαιωθεί ότι περιλαμβάνονται όλα τα σημαντικά χαρακτηριστικά.

3.2.1 Η εφοδιαστική της αλυσίδα

Η δομή της εφοδιαστικής αλυσίδας, χαρακτηρίζεται ως ένα ιεραρχικό σύστημα. Στο σχήμα 1, που υπάρχει παρακάτω, δείχνεται η δομή της, σε ένα γενικότερο επίπεδο. Το σύστημα αυτό χωρίζεται σε τρία επίπεδα: 1) το ανώτερο επίπεδο (top level), 2) το μακροσκοπικό επίπεδο (macro level) και 3) το μικροσκοπικό επίπεδο (micro level).



Σχήμα 3.1: Δομή αλυσίδας εφοδιασμού

Στο top level, η εφοδιαστική αλυσίδα κατασκευής ημιαγωγών, χωρίζεται σε δύο επίπεδα, μεταξύ των οποίων υπάρχει μια αποθήκη προϊόντων: [REDACTED] και [REDACTED]. Όπως αναφέρθηκε και στο δεύτερο κεφάλαιο, στην περιοχή του [REDACTED] συμπεριλαμβάνονται όλα τα στάδια κατασκευής ηλεκτρικών πλακιδίων (wafers), ενώ στο [REDACTED] αφορά τα στάδια κοπής, μέτρησης και συγκέντρωσης για τη δημιουργία ενός μικροτσίπ. Η ενδιάμεση αποθήκη, χρησιμεύει στη διατήρηση ορισμένων προϊόντων, εξαιτίας των διαφορετικών απαιτήσεων των πελατών ως προς το χρόνο παραλαβής τους.

Το μακροσκοπικό επίπεδο (macro level) αποτελεί το επίπεδο του εργοστασίου ([REDACTED]), στο οποίο υπάρχουν πολλές μονάδες παραγωγής ([REDACTED]). Κάθε μονάδα παραγωγής παράγεται ανεξάρτητα από τις άλλες και μπορεί να βρίσκεται σε διαφορετικά κτίρια. Έτσι, οι διαφορετικές μονάδες παραγωγής προγραμματίζονται και ελέγχονται ξεχωριστά και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους δε γίνονται με συνεχή τρόπο. Στο συγκεκριμένο επίπεδο, σκοπός θα αποτελούσε η αύξηση στην αλληλεπίδραση και στην ανταλλαγή πληροφοριών, μεταξύ των διαφορετικών οντοτήτων.

Το μικροσκοπικό επίπεδο (micro level) είναι το επίπεδο των μονάδων παραγωγής. Μέσα σε μια μονάδα παραγωγής, λειτουργούν παράλληλα πολλές ομάδες

μηχανών, όπου κάθε μια ομάδα περιλαμβάνει ένα συγκεκριμένο και ανεξάρτητο αριθμό πανομοιότυπων μηχανών. Κάθε μια διαφορετική μηχανή, μπορεί να χωριστεί σε περισσότερους από ένα θάλαμο επεξεργασίας. Για το έργο του [REDACTED] τα διαφορετικά μοντέλα που αφορούν τις μηχανές, όπως είναι τα μοντέλα παρτίδας (batch models), τα μοντέλα ατομικού ηλεκτρικού πλακιδίου (single wafer models) και τα μοντέλα συμπλέγματος (cluster models), θα πρέπει να συγκεντρωθούν σε ένα ή δύο μοντέλα το πολύ, έτσι ώστε να είναι εφικτή η προσομοίωσή τους. Το μικροσκοπικό μοντέλο έχει ορισμένα χαρακτηριστικά, τα οποία διαφέρουν στις περιοχές [REDACTED] και [REDACTED]. Γενικά στο [REDACTED] παρατηρείται γραμμική σχέση μεταξύ των προϊόντων, ενώ στο [REDACTED] πιο περίπλοκες.

Η εταιρεία [REDACTED] με τη σειρά της, γνωστοποίησε τη δομή της εφοδιαστικής της αλυσίδας σε μακροσκοπικό επίπεδο, δίνοντας την αντίστοιχη ονομασία των περιοχών παραγωγής της. Πιο συγκεκριμένα, το εργοστάσιο κατασκευής ημιαγωγών της [REDACTED] αποτελείται από τα συγκεκριμένα τμήματα, έχοντας την εξής αγγλική ορολογία:

1. **Waferfab:** Είναι το στάδιο που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2,
2. [REDACTED] Αναφέρεται σε κατασκευή αισθητήρα,
3. **Wafertest:** Αναφέρεται σε τεστ του wafer στην περιοχή του [REDACTED]
4. **Stock:** Αποτελεί την αποθήκη μεταξύ των [REDACTED] και [REDACTED]
5. **Cutting:** Αναφέρεται σε διαδικασίες κοπής του wafer και μείωσης του μήκος τους.
6. **Assembly:** Αποτελεί το στάδιο, όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2 7)
Packaging: Είναι το στάδιο που συσχετίζεται με το Assembly και αναφέρεται επίσης, στο δεύτερο κεφάλαιο,
7. **Final Test:** Αναφέρεται στο τελικό τεστ, πριν παραδοθεί στον πελάτη.

Τα πρώτα τρία στάδια βρίσκονται στην περιοχή [REDACTED] το τέταρτο στάδιο αποτελεί την αποθήκη προϊόντων και τα στάδια 5 έως 8 βρίσκονται στην περιοχή του [REDACTED]

3.2.2 Περιγραφή του φυσικού συστήματος

Το φυσικό σύστημα έχει ορισμένα χαρακτηριστικά, τόσο σε μικροσκοπικό, όσο και σε μακροσκοπικό επίπεδο.

Όσον αφορά το μικροσκοπικό επίπεδο, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός συνόλου μηχανών. Κάθε ατομική μηχανή ανήκει σε μια ομάδα μηχανών, που λέγεται

τύπος εξοπλισμού (), ο οποίος με τη σειρά του ανήκει σε μια μονάδα επεξεργασίας (). Με αντίστοιχη σειρά, μια μονάδα επεξεργασίας ανήκει σε μια μονάδα παραγωγής (), η οποία ανήκει στο εργοστάσιο () και το μεγαλύτερο υπερσύνολο αποτελεί η αλυσίδα εφοδιασμού. Οι μηχανές επεξεργάζονται προϊόντα με συγκεκριμένες διαδικασίες. Η κάθε μία από αυτές έχει το δικό της τρόπο φόρτωσης, ο οποίος μπορεί να είναι είτε αυτοματοποιημένος, είτε χειροκίνητος. Επίσης μπορεί να χρειάζονται ορισμένες πρόσθετες πρώτες ύλες και προμήθειες. Όσον αφορά την κατάσταση που μπορεί να βρεθεί η κάθε μηχανή, αυτή μπορεί να είναι είτε ανενεργή (down), που σημαίνει ότι δε μπορεί να παράγει, είτε ενεργή (up), που σημαίνει ότι είναι διαθέσιμη για παραγωγή. Σε περίπτωση διακοπής της λειτουργίας της (downtime), σημαντική πληροφορία είναι, το αν αυτή η διακοπή είναι προγραμματισμένη ή όχι. Για παράδειγμα η συντήρηση είναι προγραμματισμένη, ενώ η επισκευή δεν είναι. Μετά τη μη προγραμματισμένη της διακοπή, θα πρέπει να γίνεται γνωστός ο τρόπος που επανήλθε στην παραγωγή, καθώς και η κατάσταση της παρτίδας, η οποία επεξεργαζόταν εκείνη τη στιγμή. Επιπλέον, η μηχανή χαρακτηρίζεται από την ικανότητά της (capability). Το μέγεθος αυτό, αποτελεί ένα δείκτη που αναφέρεται στα βήματα της κάθε επεξεργασίας, που μπορούν να συμβούν στην αλυσίδα εφοδιασμού και για κάθε βήμα σε ποια μηχανή είναι δυνατό να πραγματοποιηθούν.

Επιπρόσθετα, στα συστήματα παραγωγής ημιαγωγών, οι μηχανές διαχωρίζονται σε αυτές που παίρνουν ατομικά ηλεκτρικά πλακίδια (single wafer) και σε μηχανές με ομάδες παρτίδων (batching). Τις περισσότερες φορές παρατηρείται, παραγωγή ομάδων παρτίδων, ωστόσο υπάρχει και παραγωγή ατομικών παρτίδων. Κάθε τύπος μηχανών, διαχωρίζεται σε επιμέρους είδη, καθώς τόσο στις single wafer μηχανές, όσο και στις batching μηχανές, υπάρχει η παραγωγή σε ακολουθία, σε σειριακή μορφή και σε παράλληλη μορφή. Στο σημείο αυτό αξίζει να τονιστεί, ότι στις μηχανές που επιδέχονται ομάδες παρτίδων, ο αριθμός των παρτίδων σε κάθε ομάδα, μπορεί να ποικίλλει και δεν είναι πάντα σταθερός. Ένας ακόμα διαχωρισμός των μηχανών είναι μηχανές συμπλέγματος (cluster machines) και αυτόνομες μηχανές (standalone machines). Στον πρώτο τύπο κατά σειρά, πολλές επεξεργασίες μπορούν να εκτελούνται ταυτόχρονα και ανεξάρτητα μεταξύ τους, ενώ στο δεύτερο τύπο, αξίζει να σημειωθεί ότι οι αποθηκευτικοί χώροι των μηχανών (buffers) είναι ευέλικτοι και

λαμβάνονται ως άπειροι. Ένα τελευταίο σημαντικό στοιχείο για τη μηχανή, αποτελεί η απόδοσή της και συγκεκριμένα η διακύμανση της απόδοσης της.

Πέραν όμως της αναφοράς που έγινε στο επίπεδο των μηχανών, θα πρέπει να γίνει αντίστοιχη σε πιο γενικό επίπεδο. Σε μακροσκοπικό επίπεδο, θα πρέπει να αναμιχθούν οντότητες και επομένως μηχανές. Πιο συγκεκριμένα, μια μονάδα παραγωγής, αποτελείται από μια ομάδα μηχανών και αντιμετωπίζεται σαν μια μηχανή. Στο επίπεδο αυτό, θα πρέπει να είναι γνωστή, η μέγιστη χωρητικότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας σε ένα προϊόν, έτσι ώστε να μπορεί να καθοριστεί και ο αριθμός των παρτίδων που μπορούν να υπάρξουν σε αυτήν, με παράλληλη μείωση των χρόνων αναμονής τους. Εκτός από αυτόν τον παράγοντα, σε μακροσκοπικό επίπεδο θα πρέπει να παρέχονται οι εξής πληροφορίες: 1) μέγιστη χωρητικότητα κάθε προϊόντος (αριθμός παρτίδων), 2) ελάχιστος χρόνος κύκλου (CT), 3) μέγιστος αριθμός παρτίδων σε επεξεργασία (WIP), 4) συχνότητα εκκίνησης και 5) συχνότητα παράδοσης. Όπως γίνεται κατανοητό, οι παράγοντες που επηρεάζουν το micro level και αναφέρθηκαν προηγουμένως, επηρεάζουν αντίστοιχα και το macro level.

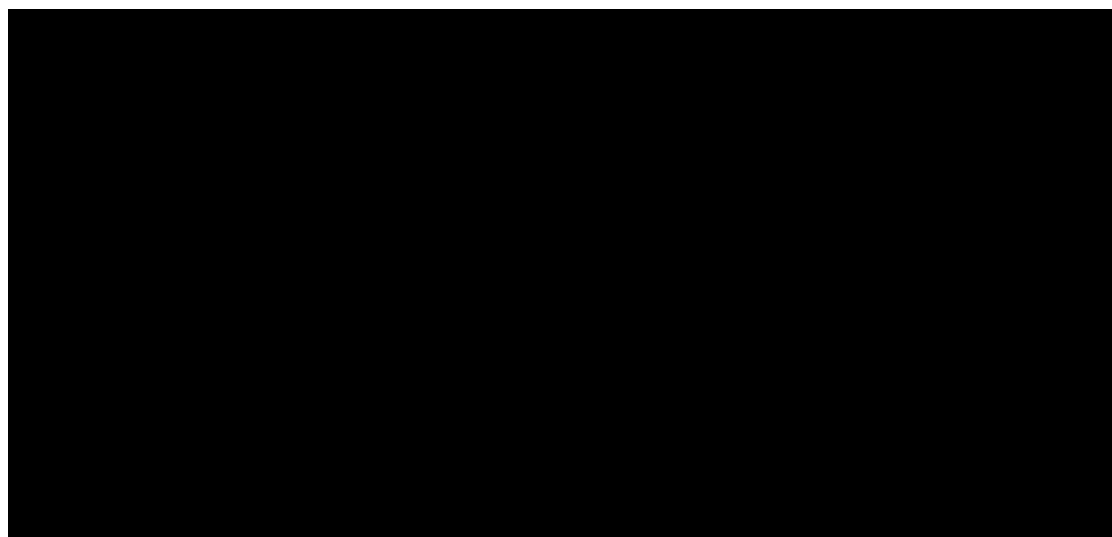
Τέλος, το εργοστάσιο περιέχει χαρακτηριστικά, τα οποία ισχύουν σε όλη την έκταση του εργοστασίου, χωρίς να δίνονται ξεχωριστά σε κάθε μηχανή. Ορισμένα από αυτά είναι: 1) διαθεσιμότητα εργατών, για τους οποίους θα πρέπει να είναι γνωστό, κάθε στιγμή, το πότε είναι διαθέσιμοι για εργασία, 2) διαλείμματα των εργαζομένων, 3) πίνακας προσόντων, που θα γνωστοποιεί τις δεξιότητες των εργαζομένων σε κάθε εργασία. Η μεταφορά αποτελεί ένα ακόμα χαρακτηριστικό του εργοστασίου. Στο micro level, λαμβάνεται ως μεταφορά μεταξύ μηχανών και στο macro level μεταξύ εργοστασίων.

3.3 Περιγραφή των δεδομένων

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται και περιγράφονται τα δεδομένα, όπως στάλθηκαν από τη [REDACTED] και αφορούν την εφοδιαστική της αλυσίδα. Τα δεδομένα αυτά, προσκομίστηκαν σε έξι διαφορετικά αρχεία excel. Πιο συγκεκριμένα, το αρχείο με ονομασία "[REDACTED]", δείχνει την αλλαγή της κατάστασης μιας μηχανής ([REDACTED] σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, στο εργοστάσιο του [REDACTED]. Επομένως, για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, υπάρχει ενημέρωση για το ποιά ήταν η κατάσταση της μηχανής πριν και μετά από αυτήν. Ως κατάσταση στο συγκεκριμένο αρχείο, εννοείται η διαδικασία κάτω από την οποία

βρίσκεται. Για παράδειγμα, δείχνεται εάν είναι διαθέσιμη για παραγωγή (available), εάν είναι υπό συντήρηση (maintenance), εάν υποβάλλεται σε κάποια εργασία (test) και άλλα. Στο επόμενο αρχείο με τίτλο “ [REDACTED] [REDACTED]” οι μηχανές κατατάσσονται σε τύπους μηχανών ([REDACTED]), αυτές με τη σειρά τους σε τοποθεσίες ([REDACTED] ενώ το μεγαλύτερο υπερσύνολο που αναφέρεται είναι η περιοχή παραγωγής ([REDACTED]). Συνεπώς, όπως γίνεται έκολα αντιληπτό, ισχύει ότι [REDACTED] [REDACTED]. Επιπλέον, παρατίθεται αρχείο με ονομασία “ [REDACTED] [REDACTED]”, το οποίο φανερώνει την πορεία μιας παρτίδας, καθώς αυτή μεταφέρεται μεταξύ των περιοχών παραγωγής στο εργοστάσιο του [REDACTED] το 2016. Ένα άλλο αρχείο που έχει τον τίτλο “ [REDACTED]”, αναφέρεται στις καθημερινές επεξεργασίες και στους μέσους χρόνους αναμονής σε κάθε περιοχή παραγωγής στο εργοστάσιο.

Τα τελευταία αρχεία που στάλθηκαν, χρήζουν περισσότερης ανάλυσης, καθώς αποτέλεσαν το κυρίως αντικείμενο για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας. Τα αρχεία αυτά φέρουν την ονομασία “ [REDACTED]” και “ [REDACTED]” και αναλύουν την πορεία κάθε παρτίδας σε κάθε περιοχή παραγωγής για το μήνα [REDACTED]. Η γενική μορφή των δεδομένων αυτών φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 3.2: Απεικόνιση δεδομένων

Πριν την αξιολόγηση των δεδομένων αυτών, θα ερμηνευθεί πρώτα το περιεχόμενο τους. Κάθε στήλη περιλαμβάνει δεδομένα που αναφέρονται σε ένα συγκεκριμένο στοιχείο. Το αρχείο συμπεριλαμβάνει τις παρτίδες ([REDACTED] οι οποίες

ανήκουν σε μια οικογένεια παρτίδων (). Δίνονται επίσης, οι ονομασίες των προϊόντων () και των περιοχών παραγωγής, όπως γίνεται και στα προηγούμενα αρχεία. Επιπλέον, γνωστοποιούνται οι συνταγές () καθώς και τα στάδια (). Ως συνταγή ορίζεται η σειρά των σταδίων παραγωγής που πρέπει να λάβει ένα προϊόν, για την οποία θα πρέπει να γίνεται γνωστή η διαδρομή της (), μια λίστα που περιλαμβάνει την αλληλουχία κάθε προϊόντος, καθώς και η ικανότητα της μηχανής () η οποία περιεγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Τα στάδια () δείχνουν τη ροή των εργασιών και σχετίζονται άμεσα με τη συνταγή. Άλλα στοιχεία που αναφέρονται είναι οι μηχανές () οι οποίες υπάγονται σε οικογένειες μηχανών (). Επιπρόσθετα, παρέχονται πληροφορίες για χρονικές στιγμές, οι οποίες αναφέρονται σε παρτίδες, όταν αυτές ξεκίνησαν να μεταφέρονται στην ουρά της μηχανής προκειμένου να επεξεργαστούν, όπου και περιμένουν να επεξεργαστούν () όταν ξεκίνησαν την επεξεργασία τους () καθώς και όταν την τερμάτισαν (). Τέλος, υπάρχουν πληροφορίες για το μέγεθος της παρτίδας σε wafers τη στιγμή της εισόδου της επεξεργασίας () και τη στιγμή της εξόδου από αυτήν (). Στο σημείο αυτό, πρέπει να αναφερθεί ότι, τα ονόματα των προϊόντων, οι τύποι των μηχανών και οι περιοχές παραγωγής, δεν είναι γνωστά για λόγους εμπιστευτικότητας και έχουν κωδικές ονομασίες. Οι ονομασίες, που αφορούν τις περιοχές παραγωγής είναι, όπως λήφθηκαν από το αρχείο “ ”, οι εξής: 1) () για το () 2) () για το () 3) () για το () 4) () για την () () 5) () για το () 6) () και () για το () () και () αντίστοιχα) και 7) () και () για το ()t. Τα πρώτα 3 ανήκουν στο () και τα τελευταία 3 στο (). Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, παρουσιάζεται η ανάλυση και η αξιολόγηση που έγινε στα προαναφερθέντα δεδομένα.

Κεφάλαιο 4 Ανάλυση των Δεδομένων

4.1 Γενική επεξεργασία

Η παρούσα παράγραφος της εργασίας, αφορά τα δεδομένα που περιέχονται στα αρχεία excel με όνομα “████████████████████” και “████████████████████”, τα οποία ελήφθησαν από τη ██████████. Όπως είναι ήδη γνωστό, τα αρχεία αυτά παρέχουν πληροφορίες σχετικά με το ιστορικό της ροής των υλικών (historical material flow) που περνούν από τις παραγωγικές εγκαταστάσεις της ██████████ στο ██████████ εντός του ██████████ του ██████████. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε παρτίδα δίνονται μια σειρά από πληροφορίες για την επεξεργασία (operation) που υπέστη.

Το πρώτο αρχείο περιέχει δεδομένα από το πρώτο σχεδόν μισό του ██████████ του ██████████ ενώ το δεύτερο αντίστοιχα από το δεύτερο μισό. Ο όγκος των δεδομένων ήταν ο λόγος που καταγράφηκαν σε δύο αρχεία αντί για ένα. Μπορεί να αναφέρθηκε ότι ο χρονικός ορίζοντας των δεδομένων είναι ο ██████████ του ██████████ ωστόσο αυτό δεν αντικατοπτρίζει απόλυτα την αλήθεια. Μέσα στα δεδομένα περιέχονται παρτίδες που ξεκίνησαν να περιμένουν την επεξεργασία τους, πολύ νωρίτερα από αυτόν τον μήνα, ακόμη και χρόνια πριν. Υπάρχουν, επίσης, παρτίδες των οποίων η επεξεργασία τελειώνει, ακόμη και αρκετούς μήνες μετά τον ██████████ του ██████████. Το κοινό στοιχείο, ωστόσο, όλων αυτών των παρτίδων είναι το γεγονός ότι ξεκίνησαν να υφίστανται επεξεργασία, δηλαδή εισήλθαν στο μηχανήμα, το συγκεκριμένο ακριβώς μήνα ανεξαρτήτως άλλων ιδιοτήτων. Και στις 3 αυτές κατηγορίες τα δεδομένα δίνονται σε μορφή “datetime”, δηλαδή παρέχεται η ημερομηνία και η ώρα που σηματοδοτεί την έναρξη του εκάστοτε συμβάντος. Με άλλα λόγια, τα αρχεία περιέχουν δεδομένα για παρτίδες που ξεκίνησαν να επεξεργάζονται εκείνον ακριβώς το μήνα, αγνοώντας τις παρτίδες, οι οποίες χρονικά μπορεί να ξεκίνησαν την επεξεργασία τους, έστω και λίγα δευτερόλεπτα εκτός αυτού του χρονικού πλαισίου. Το γεγονός αυτό, όπως θα γίνει κατανοητό και στη συνέχεια της παρούσας εργασίας, αποτελεί εμπόδιο στην εξαγωγή σαφών και με ακρίβεια αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων. Είναι όμως μονόδρομος, προκειμένου να καταστεί δυνατή η διαχείριση ενός τέτοιου όγκου δεδομένων.

Η ανάλυση/ομαδοποίηση των δεδομένων από πλευράς μας διεξήχθη σε επίπεδο περιοχών παραγωγής (████████████████████). Κίνητρο μας αποτέλεσε η μακροσκοπική

ενασχόληση με τα δεδομένα. Από τα δεδομένα στα αρχεία, διαπιστώσαμε πως η κατηγορία [REDACTED] αποτελεί το μεγαλύτερο δυνατό υπερσύνολο κατάταξης των παρτίδων/επεξεργασιών (highest possible aggregation level). Άλλωστε και οι αριθμοί των επιμέρους κατηγοριών στα αρχεία, επιβεβαιώνουν το συγκεκριμένο ισχυρισμό, αφού στην κατηγορία [REDACTED] υπάρχουν [REDACTED] διαφορετικά σύνολα, πολύ λιγότερα σε σύγκριση με κάθε άλλη κατηγορία, όπως αυτές των μηχανημάτων και των οικογενειών μηχανημάτων. Με αυτόν τον τρόπο, κατέστη πολύ πιο διαχειρίσιμος ο όγκος των δεδομένων.

Ιδιαίτερη θέση στην παρούσα εργασία κατέχουν επιπλέον, οι χρόνοι και ειδικά η χρονική στιγμή που ξεκινούσε μια παρτίδα να μεταφέρεται στην ουρά του μηχανήματος, όπου και θα περίμενε μέχρι και την επεξεργασία της και η χρονική στιγμή που σηματοδοτούσε τη λήξη της επεξεργασίας της εκάστοτε παρτίδας. Είναι γεγονός ότι στα αρχεία παρουσιάστηκαν ορισμένα σφάλματα. Πιο συγκεκριμένα, δεν περιέχονταν στοιχεία σχετικά με αυτούς τους δύο χρόνους σε κάποιες επεξεργασίες, με αποτέλεσμα να μη μπορεί να γίνει κάποια ανάλυση και να βγει συμπέρασμα σχετικά με τη διάρκεια επεξεργασίας αυτών των παρτίδων ή τη διάρκεια αναμονής τους στην ουρά. Έτσι, οι συγκεκριμένες επεξεργασίες δεν ελήφθησαν υπόψη, κάτι που έγινε και σε περιπτώσεις παρτίδων με μηδενική διάρκεια αναμονής στην ουρά και επεξεργασία ([REDACTED]). Στην ανάλυσή μας, επομένως, τέτοιες παρτίδες δε διαδραμάτισαν κάποιο ρόλο, αφού δε συμπεριλήφθησαν στους υπολογισμούς.

Κάποιες επιπλέον ενδιαφέρουσες πληροφορίες που σχετίζονται και με τον τρόπο, με τον οποίο πραγματοποιήθηκε η ανάλυση της εν λόγω διπλωματικής, αφορούν ορισμένες λειτουργίες του excel. Προσθέτοντας ένα φίλτρο στην πρώτη γραμμή μπορεί κανείς να απομονώσει ένα συγκεκριμένο [REDACTED] και να δει όλες τις παρτίδες που περνούν από αυτό, μέσα στον δοσμένο χρονικό ορίζοντα μαζί με όλα τα στοιχεία των επεξεργασιών που υπέστησαν. Πραγματοποιώντας, ακόμη, μια χρονολογική ταξινόμηση στη στήλη [REDACTED] είναι δυνατό να παρατηρήσει κανείς το χρονικό ιστορικό αυτού του [REDACTED], με την έννοια ότι διακρίνει τη χρονική αλληλουχία, με την οποία κατέφθασαν και ξεκίνησαν να περιμένουν οι παρτίδες για την επεξεργασία τους. Επιπλέον, αναζητώντας και μαρκάροντας κανείς μια συγκεκριμένη παρτίδα με τον κωδικό της και με χρονολογική ταξινόμηση των [REDACTED] της, μπορούμε να μελετήσουμε το ιστορικό αυτής της παρτίδας, με την έννοια ότι παρατηρούμε από ποια [REDACTED] πέρασε, με ποια σειρά, πόσες

επεξεργασίες υπέστη, πόσο διήρκησαν αυτές και πολλές ακόμη ενδιαφέρουσες πληροφορίες. Μέσα από αναζητήσεις διαπιστώθηκε ότι ένα μεγάλο ποσοστό των δεδομένων προέρχεται από το ██████████ το οποίο αφορά το ██████████, ενώ αρκετές επεξεργασίες καταγράφηκαν το δεδομένο χρονικό ορίζοντα και στο ██████████ όπου και γίνονται τα τελικά τεστ.

4.1.1 Ο χρόνος κύκλου (cycle time)

Κύρια θέση στην έρευνά μας κατέχει ο χρόνος κύκλου (γνωστός και ως cycle time στο χώρο της οργάνωσης παραγωγής) ως μέτρο απόδοσης. Όπως έχει ήδη ξεκαθαριστεί, η βιομηχανία ημιαγωγών χαρακτηρίζεται από πολύπλοκες και σύνθετες διαδικασίες παραγωγής, τεχνολογικά αναπτυγμένο εξοπλισμό και υψηλή μεταβλητότητα χρόνων παραγωγής. Δεδομένος είναι επίσης και ο σχεδόν διπλασιασμός της πυκνότητας των ημιαγωγών, περίπου κάθε 2 χρόνια. Αυτό έχει ως επακόλουθο οι σύγχρονες γραμμές παραγωγής της βιομηχανίας ημιαγωγών να περιλαμβάνουν εκατοντάδες στάδια και μηχανές, οι οποίες με τη σειρά τους οδηγούν σε μεγάλα και μεταβλητά cycle time. Αντιλαμβάνεται κανείς, επομένως, πόσο σημαντικός γίνεται ο έλεγχος του cycle time ως μέτρο απόδοσης στη βιομηχανία ημιαγωγών.

Μια παρτίδα από την αρχή της επεξεργασίας της ως πρώτη ύλη μέχρι και το τέλος της με τη δημιουργία του τελικού προϊόντος, περνά από έναν αριθμό /σταδίων βημάτων παραγωγής (processing steps). Το μέσο cycle time (CT) μιας παρτίδας προσδιορίζεται από το άθροισμα των επιμέρους cycle time των, έστω N , απαιτούμενων βημάτων που οφείλει να περάσει η παρτίδα αυτή, μέχρι και την παραγωγή του τελικού προϊόντος, δηλαδή $CT = \sum_{i=1}^N CT_i$. Το επιμέρους CT ενός βήματος επεξεργασίας μιας παρτίδας, περιλαμβάνει το χρόνο μεταφοράς της παρτίδας από τον προηγούμενο εξοπλισμό (μηχάνημα) στον τρέχων (physical transport time), ο οποίος εξαρτάται κατά βάση από τη διάταξη και το σύστημα χειρισμού των υλικών (material handling system), καθώς και το χρόνο αναμονής στην ουρά (queue) της μηχανής (waiting time). Η αναμονή αυτή, μπορεί να οφείλεται σε μη διαθεσιμότητα, σετάρισμα (setup), απασχόληση ή επισκευή της μηχανής. Ως παράγοντες που επηρεάζουν, είναι επίσης και ο χρόνος επεξεργασίας (processing time), που περιλαμβάνει το χρόνο του συνόλου όλων εκείνων των δραστηριοτήτων που λαμβάνουν χώρα στη μηχανή για την

ολοκλήρωση της τρέχουσας επεξεργασίας. Δηλαδή, για μια i διαδικασία το επιμέρους cycle time της είναι:

$$CT_i = Transport_i + Wait\ in\ line_i + Process_i$$

Σύμφωνα με την ανάλυση του CT που έγινε προηγουμένως, από τα δεδομένα που δόθηκαν από τη [REDACTED] προκύπτει:

- ο χρόνος μεταφοράς της παρτίδας από το προηγούμενο στο επόμενο μηχάνημα για επεξεργασία, συν τον χρόνο αναμονής στην ουρά του μηχανήματος αυτού ($Transport_i + Wait\ in\ line_i$), αποτελεί τη διαφορά [REDACTED].
- ο καθαρός χρόνος επεξεργασίας της παρτίδας (processing time), είναι η διαφορά [REDACTED].
- ο συνολικός επιμέρους χρόνος κύκλου (CT_i) μιας i επεξεργασίας, είναι η διαφορά [REDACTED].

Από τους 3 αυτούς χρόνους αυτός που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παρούσα διπλωματική εργασία είναι ο τρίτος. Για αυτό το λόγο, στα αρχεία που παραδόθηκαν από τη [REDACTED] προστέθηκε μια ακόμη στήλη με το όνομα [REDACTED] και δίνει τον επιμέρους cycle time, που ξόδεψε μια παρτίδα σε μια συγκεκριμένη επεξεργασία (operation), στο [REDACTED] που βρισκόταν (με βάση το οποίο, όπως έχουμε ήδη τονίσει, γίνεται η κατηγοριοποίηση των δεδομένων) και προκύπτει από τη διαφορά των “datetimes” [REDACTED]. Η διαφορά αυτή, δίνει ωστόσο το επιμέρους cycle time σε ημέρες και, προκειμένου να πάρουμε το χρονικό διάστημα σε ώρες, πολλαπλασιάσαμε με 24 το αποτέλεσμα της διαφοράς.

4.2 Στατιστική ανάλυση δεδομένων

Στην παρούσα παράγραφο, αναλύονται στατιστικά τα δεδομένα των αρχείων excel που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Πιο συγκεκριμένα, παρέχονται ιστογράμματα των χρόνων κύκλου, όπως αυτοί καταγράφηκαν στις περιοχές παραγωγής, από τις διαφορετικές παρτίδες που εισήχθησαν εκεί. Οι χρόνοι αυτοί εξήχθησαν από μελέτη ολόκληρου του μήνα, δηλαδή και από τα δύο αρχεία. Επίσης, λαμβάνονται σε ώρες και αποτελούν άθροισμα των επιμέρους χρόνων που κάθε παρτίδα έκανε σε μια μεμονωμένη εργασία. Επιπλέον, αναφέρονται σε συνολικό χρόνο, που μια παρτίδα σημείωσε στη συγκεκριμένη περιοχή παραγωγής, ακόμα και

αν αυτή επέστρεψε εκεί, έχοντας πάει ύστερα σε άλλη, για να επεξεργαστεί. Η εύρεσή του συνολικού χρόνου, βρέθηκε μέσω της χρήσης της συνάρτησης “sumif” από το excel, για κάθε παρτίδα στα δύο αρχεία. Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε στις περιοχές παραγωγής, οι οποίες δομούν την εφοδιαστική αλυσίδα της ████████ όπως αυτές αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους.

4.2.1 Περιγραφή της διαδικασίας

Για την πραγματοποίηση των ιστογραμμάτων, χρησιμοποιήθηκε κώδικας προγραμματισμού μέσω της matlab. Ο κώδικας αυτός έπαιρνε ως δεδομένα, μέσα από τα αρχεία του excel, τους αντίστοιχους χρόνους τους οποίους και εξέταζε, με σκοπό την εύρεση της καλύτερης συνεχούς κατανομής. Κατά τη συλλογή των δεδομένων, λαμβάνονταν υπόψη το σύνολο των παρατηρήσεων, που αναφέρονταν σε χρόνους. Για την πραγματοποίηση ιστογραμμάτων, δε λήφθηκαν υπόψη, κάποιες ακραίες τιμές που ορίζονται ως «outliers». Με τον όρο «outlier», ονομάζουμε μια παρατήρηση ενός τυχαίου δείγματος από κάποιον πληθυσμό, η οποία απέχει, κατά μια μη κανονική και αναμενόμενη απόσταση, από τις υπόλοιπες παρατηρήσεις, η μετρούμενη ιδιότητα των οποίων θεωρείται κανονική. Φυσικά, για να καθορίσει κανείς ποιες παρατηρήσεις θεωρούνται «outliers», είναι προηγουμένως απαραίτητο, να έχει καθοριστεί ποιες παρατηρήσεις ανάλογα με την ιδιότητά τους, χαρακτηρίζονται ως κανονικές. Δεν υπάρχει κάποιος ιδιαίτερος κανόνας για την παράβλεψη τους. Θα μπορούσε κανείς να συμφωνήσει πως από κάποιες μονάδες τυπικών αποκλίσεων και πέρα, οι παρατηρήσεις θεωρούνται «outliers» και παραβλέπονται. Σε κάθε περίπτωση ωστόσο, έγκειται στη απόφαση του αναλυτή των δεδομένων, για το πόσες και ποιες παρατηρήσεις θα εξαιρεθούν. Όσον αφορά τα ιστογράμματα που ακολουθούν, οι τιμές αυτές δεν αφαιρέθηκαν με κάποιο συγκεκριμένο κανόνα, παρά μόνο με γνώμονα να απεικονιστεί με μεγαλύτερη ευκρίνεια το εκάστοτε ιστόγραμμα. Το ποσοστό που απορρίφθηκε αυθαίρετα είναι μικρό και όχι αισθητό, ενώ το υπόλοιπο αποτέλεσε το τελικό δείγμα για την εκτέλεση τους και αναφέρεται στη συνέχεια.

Ο κώδικας στη matlab παρέθετε ως αποτελέσματα όλες τις κατανομές που εξετάστηκαν, μαζί με τις παραμέτρους που τις χαρακτηρίζουν, δίνοντας και τα αντίστοιχα σφάλματα, για κάθε μια. Τα σφάλματα αυτά, εξήχθησαν μέσα από συγκριτικές μεθόδους (comparative methods) και βασίζονται στη συνάρτηση πιθανοφάνειας: $L(\theta/t_1, t_2, \dots, t_n) = \prod_{i=1}^n f(t_i/\theta)$. Η τυπική τους απόκλιση ισούται

με $-2\ln(L)$. Ο ορισμός τους, είναι όπως προκύπτουν από τα κριτήρια πληροφοριών Akaike (Akaike information criterion ή AIC) και Bayesian (Bayesian information criteria ή BIC) και ισούνται με: $AIC = -2\ln(L) + 2P$ και $BIC = -2\ln(L) + \ln(n) \cdot P$, όπου n είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων και P ο αριθμός των παραμέτρων. Συνεπώς, όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, «καλύτερη» θεωρούνταν η συνάρτηση, όπως αυτή προέκυπε από τον κώδικα, με τα μικρότερα σφάλματα AIC και BIC. Οι κατανομές (distributions) που εξετάστηκαν ήταν κατά σειρά: 1) Beta, 2) Birnbaum-Saunders, 3) Exponential (εκθετική), 4) Extreme value (ακραίων τιμών), 5) Gamma, 6) Generalized extreme value (γενικευμένη ακραίων τιμών), 7) Generalized Pareto, 8) Inverse Gaussian, 9) Logistic, 10) Log-logistic, 11) Lognormal (λογαριθμοκανονική), 12) Nakagami, 13) Normal (κανονική), 14) Rayleigh, 15) Rician, 16) t-location scale και 17) Weibull.

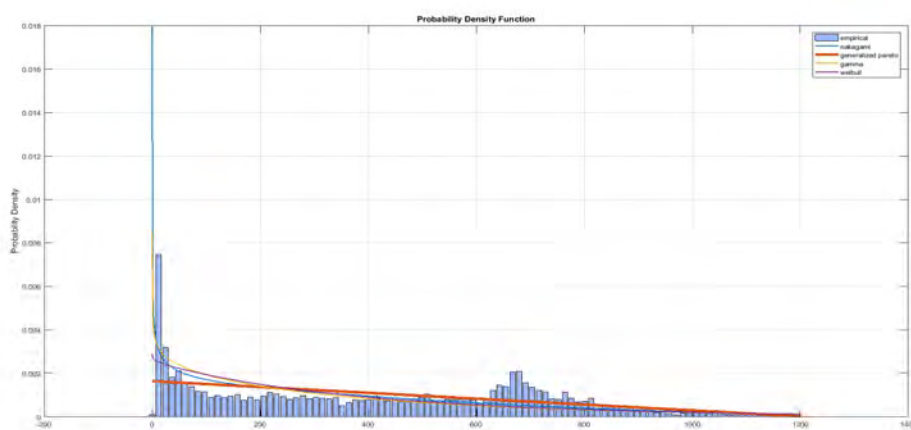
Στη συνέχεια, για τον έλεγχο της εγκυρότητας των κατανομών, έγινε έλεγχος της ορθότητάς τους (goodness of fit ή GOF). Πιο συγκεκριμένα, για την κατανομή που ταίριαζε καλύτερα στα δεδομένα, διενεργήθηκε τεστ που έδειχνε, εάν αυτή είναι έγκυρη για το τεστ που υπεβλήθη. Ο λόγος που έγινε αυτό, είναι επειδή, η καλύτερη συγκριτικά κατανομή, όπως αυτή προέκυψε, δε σημαίνει παράλληλα ότι είναι καλή από στατιστική άποψη. Η μέθοδος GOF που χρησιμοποιήθηκε είναι το Kolmogorov-Smirnov (KS) τεστ, το οποίο, γενικά, υπολογίζει την απόσταση μεταξύ της αθροιστικής κατανομής (cumulative distribution), όπως αυτή προέκυψε από τον κώδικα και της πραγματικής αθροιστικής συνάρτησης στη συγκεκριμένη κατανομή. Για παράδειγμα, σε περίπτωση που προκύψει η καλύτερη κατανομή να είναι η εκθετική, τότε το Kolmogorov-Smirnov τεστ, θα υπολογίσει τη μέγιστη απόσταση μεταξύ της αθροιστικής κατανομής για την εκθετική, που βρέθηκε μέσω της matlab και ενός δείγματος με τυχαίους αριθμούς, οι οποίοι έχουν δημιουργηθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε η κατανομή αυτή να είναι η καλύτερη για το δείγμα, χωρίς σφάλματα. Με μαθηματική σχέση συμβολίζεται ως: $D_n = \max|Fn - F|$, όπου F_n είναι η αθροιστική κατανομή της φαινομενικά καλύτερης προκύπτουσας συνάρτησης και F , η αθροιστική συνάρτηση που αναφέρεται στην κατανομή του δείγματος των τυχαίων αριθμών, οι οποίοι χαρακτηρίζουν μια συγκεκριμένη κατανομή. Για την εκτέλεση του, δημιουργήθηκε ένα νέο δείγμα, με ίδιο αριθμό παρατηρήσεων με αυτό των δεδομένων και συγκρίθηκαν μεταξύ τους. Από το τεστ αυτό, προκύπτει μια τιμή σημαντικότητας (p-value), η οποία δείχνει πόσο αποκλίνει το δείγμα που εξετάστηκε από την

πραγματική κατανομή. Για να θεωρηθεί η «καλύτερη» φαινομενικά κατανομή ως έγκυρη για το δείγμα που λήφθηκε, θα πρέπει το p-level, να είναι μεγαλύτερο από κάποιο επίπεδο σημαντικότητας (significance level ή Alpha level ή α). Ο δείκτης αυτός, ο οποίος είναι συμβατικός, είναι μια πιθανότητα και δείχνει εάν η αρχική υπόθεση (στην προκειμένη για την καλύτερη προκύπτουσα κατανομή) είναι αποδεκτή. Πιο συγκεκριμένα, εάν το p-value που βρέθηκε από το Kolmogorov-Smirnov test είναι μεγαλύτερο από το α , τότε η κατανομή που βρέθηκε είναι αποδεκτή. Εάν πάλι το p-value είναι μικρότερο από το α , τότε δε θεωρείται αποδεκτή και απορρίπτεται. Στα test που πραγματοποιήθηκαν, επίπεδο α αποτέλεσε είτε το 0.01 είτε το 0.05. Στη συνέχεια, παρατίθενται εικόνες, δείχνοντας ιστογράμματα που αφορούν τους χρόνους σε κάθε περιοχή παραγωγής που εξετάστηκε, καθώς και πληροφορίες για τη δομή του καθενός.

4.2.2 Παρουσίαση ιστογραμμάτων

Στο παρόν κομμάτι του κεφαλαίου, γίνεται η παρουσίαση των ιστογραμμάτων για κάθε περιοχή παραγωγής, που εξετάστηκε. Ως «καλύτερη», αναφέρεται εδώ, η κατανομή με το μικρότερο p-value. Να σημειωθεί ξανά ότι, οι περιοχές αυτές, οι οποίες είναι εννέα, αφορούν την εφοδιαστική αλυσίδα της ██████████

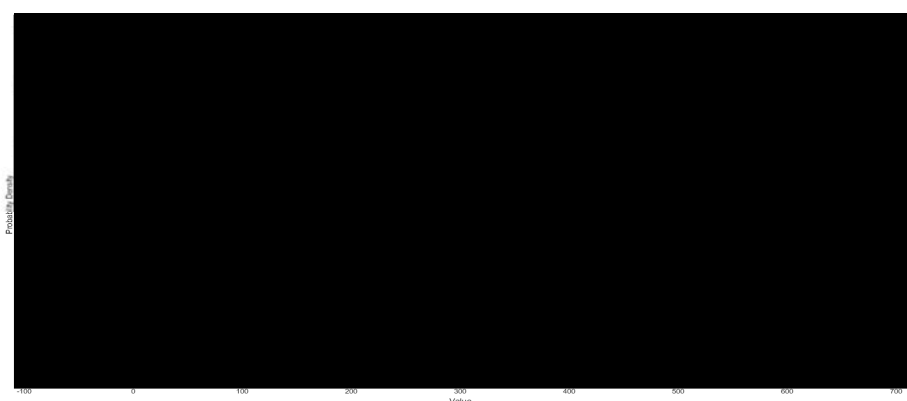
- Αρχής γενομένης από το ██████████ που αφορά το ██████████ το σύνολο των παρατηρήσεων που επεξεργάστηκαν ήταν ██████████. Ωστόσο, ως ακραίες τιμές θεωρήθηκαν αυτές που σημείωσαν χρόνο μεγαλύτερο από ██████████ ώρες, οι οποίες αποτελούσαν περίπου το ██████████% των παρατηρήσεων. Επομένως για το υπόλοιπο δείγμα, δηλαδή το ██████████%, το ιστόγραμμα, όπως αυτό προέκυψε ήταν:



Σχήμα 4.1 Ιστόγραμμα του ██████████

Από το παραπάνω ιστόγραμμα, η κατανομή που ταιριάζει περισσότερο είναι η generalized pareto, με παραμέτρους (). Το p-value, ως αποτέλεσμα του Kolmogorov-Smirnov τεστ, ήταν 7×10^{-16} , τιμή πολύ μικρή, για να γίνει αποδεκτή η συγκεκριμένη κατανομή. Η συγκεκριμένη περιοχή παραγωγής, λόγω του πολύ μικρού p-value, του μεγάλου αριθμού των παρατηρήσεων και κυρίως λόγω της ύπαρξης αρκετών παρτίδων με μεγάλο χρόνο, χρήζει περαιτέρω ανάλυσης.

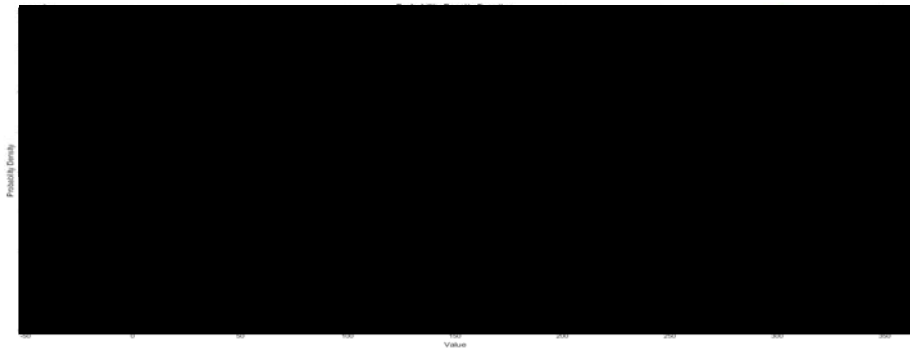
- Όσον αφορά το 1000 που αποτελεί το 1000 το δείγμα περιλάμβανε 1000 παρατηρήσεις και ως ακραίες να λογίζονται αυτές που έκαναν χρόνο μεγαλύτερο από 1000 . Οι τιμές αυτές, αντιστοιχούσαν σε ποσοστό περίπου του 10% . Το προκύπτον ιστόγραμμα, είναι:



Σχήμα 4.2 Ιστόγραμμα του 1000

Η πιο ταιριαστή κατανομή είναι η Weibull με τις αντίστοιχες παραμέτρους που τη χαρακτηρίζουν (). Ως εξαγόμενο από το τεστ, το p-value είναι 1.1×10^{-16} , τιμή πιο μικρή από κάθε επίπεδο σημαντικότητας. Συνεπώς, η κατανομή αυτή απορρίπτεται.

- Επόμενη περιοχή είναι το 1000 που αποτελεί το 1000 . Λήφθηκαν 1000 παρατηρήσεις και ακραίες τιμές θεωρήθηκαν αυτές, με χρόνο μεγαλύτερο των 1000 ωρών. Οι τιμές αυτές ανήκουν σε ποσοστό περίπου 10% . Το συγκεκριμένο ιστόγραμμα είναι:



Σχήμα 4.3 Ιστόγραμμα του [REDACTED]

Η καλύτερη φαινομενικά κατανομή είναι η Weibull, με παραμέτρους ([REDACTED]). Όσον αφορά τα εξαγόμενα από το Kolmogorov-Smirnov τεστ, το p-value είναι [REDACTED], γεγονός που την κάνει αποδεκτή για επίπεδο σημαντικότητας 0.05.

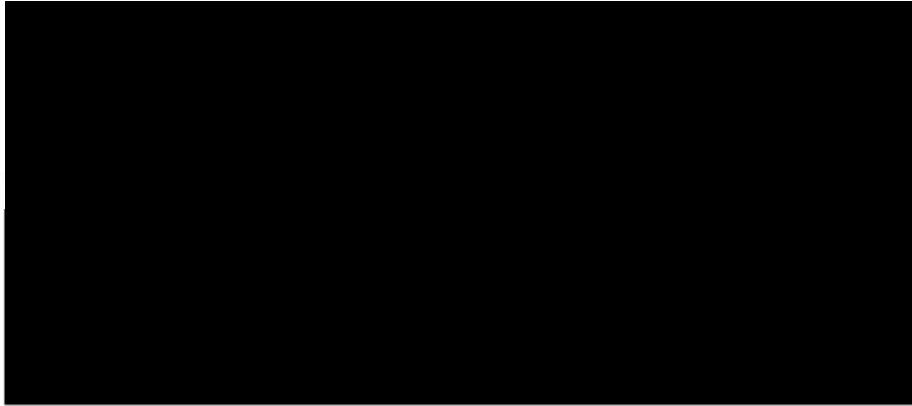
- Συνεχίζοντας με το [REDACTED] που αποτελεί την [REDACTED], το σύνολο των παρατηρήσεων ήταν [REDACTED] ενώ ακραίες τιμές λήφθηκαν όσες είχαν τιμή μεγαλύτερη από [REDACTED] ώρες, που αντιστοιχεί σε ποσοστό περίπου [REDACTED]%. Το ιστόγραμμα της είναι:



Σχήμα 4.4 Ιστόγραμμα του [REDACTED]

Η κατανομή που είναι κατάλληλη σε αυτά τα δεδομένα, είναι η Weibull με παραμέτρους ([REDACTED]). Από το Kolmogorov-Smirnov, προκύπτει ότι το p-value είναι [REDACTED], τιμή αποδεκτή για επίπεδο σημαντικότητας 0.01.

- Στη συνέχεια, επεξεργάστηκε το [REDACTED] που είναι η περιοχή του [REDACTED]. Οι παρατηρήσεις του δείγματος ήταν [REDACTED] και ακραίες, θεωρήθηκαν οι τιμές με χρόνο μεγαλύτερο από [REDACTED] ώρες, που αποτελούσαν περίπου το [REDACTED]% του δείγματος. Το ιστόγραμμα είναι ως εξής:



Σχήμα 4.5 Ιστόγραμμα του [redacted]

Η κατανομή που προσαρμόζεται καλύτερα είναι η generalized pareto με παραμέτρους [redacted]). Το p-value, όπως προκύπτει από το τεστ είναι [redacted] μεγαλύτερο του επιπέδου σημαντικότητας 0.01. Συνεπώς, η κατανομή είναι αποδεκτή.

- Η επόμενη περιοχή είναι το [redacted] που αφορά το [redacted]. Κατά τη μελέτη της, ελήφθησαν [redacted] παρατηρήσεις και κόπηκαν ως ακραίες τιμές περίπου το [redacted]%, που περιλάμβανε τιμές μεγαλύτερες από [redacted] ώρες. Το ιστόγραμμα, όπως προέκυψε είναι:



Σχήμα 4.6 Ιστόγραμμα του [redacted]

Ως καλύτερη κατανομή, προκύπτει η lognormal με τις αντίστοιχες παραμέτρους να είναι ([redacted]). Η τιμή p-value είναι [redacted], που χαρακτηρίζεται ως χαμηλή και απορρίπτεται από κάθε επίπεδο σημαντικότητας. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό, από την κλάση που εξέχει, που σημαίνει ότι πολλές παρτίδες έχουν

σημειώσει χρόνο, στο διάστημα αυτό, γεγονός που αποκλίνει πολύ στην προσαρμογή μιας συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας.

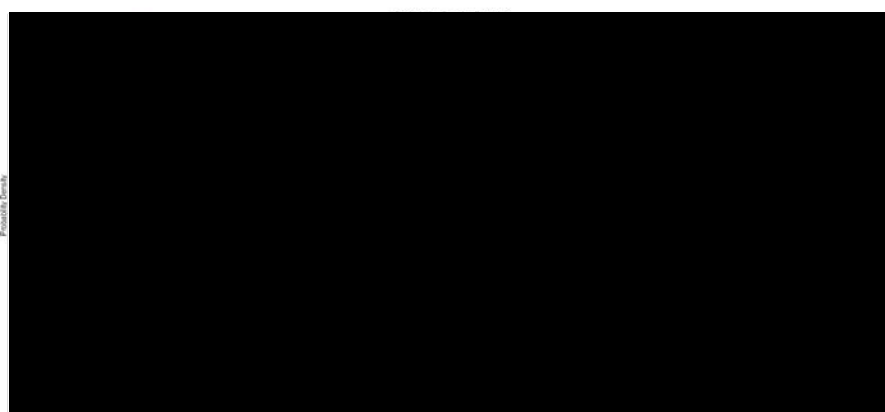
- Μια άλλη περιοχή παραγωγής είναι το [REDACTED] που χαρακτηρίζει κι αυτή το [REDACTED]. Το εξεταζόμενο δείγμα περιλάμβανε [REDACTED] παρατηρήσεις, με το ποσοστό των ακραίων τιμών να είναι στο [REDACTED]%, για τιμές μεγαλύτερες από [REDACTED] ώρες. Το ιστόγραμμα, έχει ως εξής:



Σχήμα 4.7 Ιστόγραμμα του [REDACTED]

Καλύτερη κατανομή για το παραπάνω είναι η εκθετική, με παράμετρο [REDACTED]. Το p-value, από το τεστ είναι [REDACTED] το οποίο είναι για λίγο μικρότερο του επιπέδου 0.01 (μόλις μια τάξη). Επομένως, η κατανομή δε γίνεται αποδεκτή.

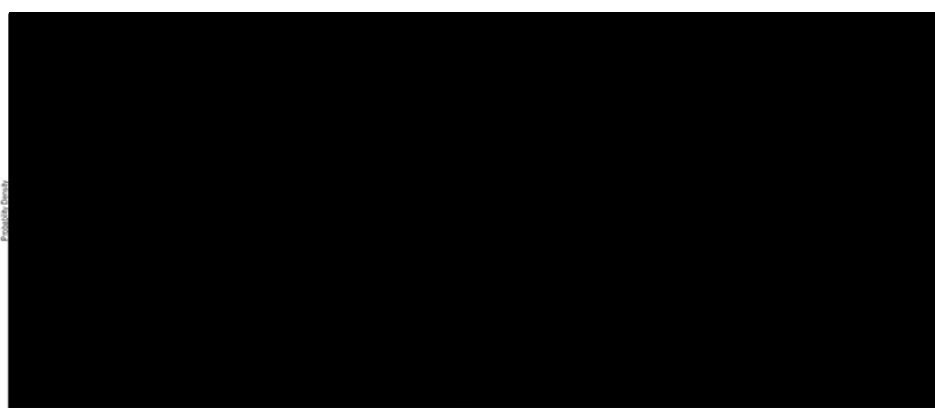
- Στη συνέχεια η περιοχή που εξετάστηκε ήταν το [REDACTED] περιοχή του [REDACTED]. Το δείγμα που λήφθηκε, περιείχε [REDACTED] παρατηρήσεις. Οι ακραίες τιμές που απορρίφθηκαν, ήταν όσες είχαν τιμή μεγαλύτερη των [REDACTED] ωρών, που ανήκει σε ποσοστό [REDACTED]%. Το αντίστοιχο ιστόγραμμα είναι:



Σχήμα 4.8 Ιστόγραμμα του [REDACTED]

Η gamma αποτελεί την πιο ταιριαστή από όσες εξετάστηκαν με παραμέτρους (██████████). Η προκύπτουσα τιμή p-value είναι ██████████ η οποία είναι μικρή και μη αποδεκτή. Παράλληλα, γίνεται μη αποδεκτή και η κατανομή gamma.

- Τελευταία περιοχή παραγωγής αποτελεί το ██████████ που είναι κι αυτή περιοχή του ██████████ Στο συγκεκριμένο τμήμα, εξετάστηκαν ██████████ παρατηρήσεις. Η ομοιογένεια του δείγματος, αντιστοιχεί περίπου στο ██████████%, με το υπόλοιπο ποσοστό να ανήκει στις ακραίες τιμές, που αφορούν χρόνους μεγαλύτερους των ██████████ ωρών. Η μορφή του ιστογράμματος είναι ως εξής:



Σχήμα 4.9 Ιστόγραμμα του ██████████

Από τη μελέτη του, ως καλύτερη συνάρτηση είναι η εκθετική με παράμετρο ██████████. Από το Kolmogorov-Smirnov τεστ, το p-value της είναι ██████████. Η τιμή αυτή είναι πολύ μικρή και έχει ως αποτέλεσμα να απορρίπτεται παράλληλα, η κατανομή που βρέθηκε.

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, παρέχεται ένας πίνακας, στον οποίο συλλέγονται όλα τα στοιχεία που προαναφέρθηκαν και τα αποτελέσματα τους δείχνονται πιο συγκεντρωτικά. Πιο συγκεκριμένα:

Περιοχή Παραγωγής	Ποσοστό δεδομένων	«Καλύτερη» κατανομή	Παράμετροι κατανομής	P-value	Αποδεκτό επίπεδο α	Αποδοχή
██████████	██████████%	generalized pareto	██████████ ██████████ ██████████	██████████ ██████████	-	Όχι
██████████	██████████%	weibull	██████████ ██████████	██████████ ██████████	-	Όχι
██████████	██████████%	weibull	██████████ ██████████	██████████	0.05	Ναι

■	■%	weibull	■	■	0.01	Ναι
■	■%	generalized pareto	■	■	0.01	Ναι
■	■%	lognormal	■	■	-	Όχι
■	■%	exponential	■	■	-	Όχι
■	■%	gamma	■	■	-	Όχι
■	■%	exponential	■	■	-	Όχι

Πίνακας 4.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων στατιστικής ανάλυσης

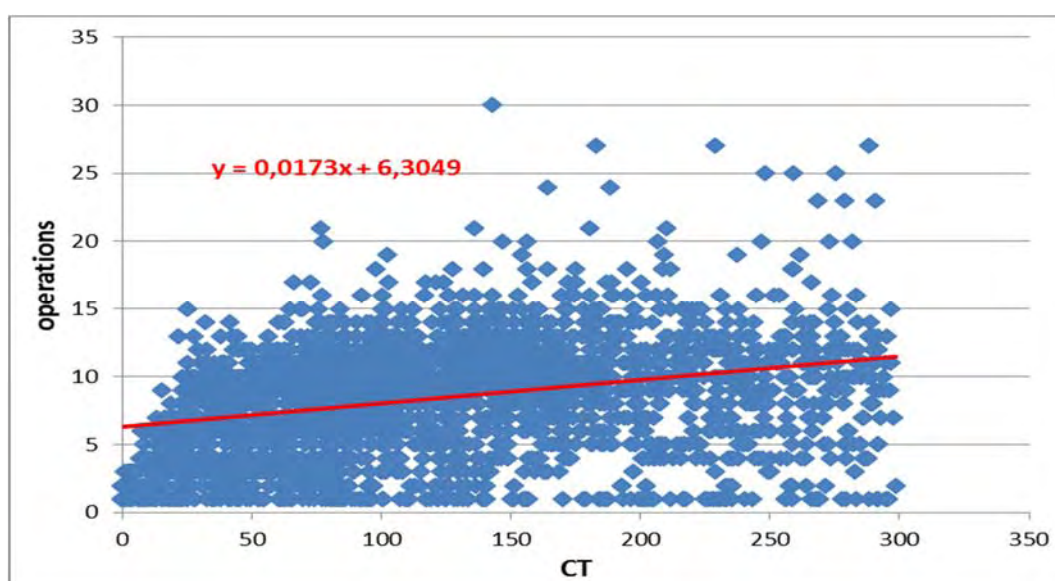
Όπως γίνεται κατανοητό από τον παραπάνω πίνακα, αποδεκτές κατανομές, σύμφωνα με το τεστ Kolmogorov-Smirnov τεστ προκύπτουν στις περιοχές ■ ■ και ■. Αντίθετα στις υπόλοιπες δεν προκύπτουν με το αντίστοιχο p-value, να έχει είτε μικρή απόκλιση από κάποιο επίπεδο σημαντικότητας, είτε μεγάλη.

4.3 Συσχετισμός επεξεργασιών με CT

Από τη μελέτη των ιστογραμμάτων, προκλήθηκε η ανάγκη για μελέτη του χρόνου κύκλου σε σύγκριση με το σύνολο των επεξεργασιών (operations), που μια παρτίδα σημείωσε σε μια περιοχή παραγωγής. Ως αριθμός επεξεργασιών στο σημείο αυτό, ορίζεται το πόσες φορές καταγράφεται μια παρτίδα σε μια περιοχή παραγωγής, όπου κάθε φορά αποτελεί μια διαφορετική πληροφορία για την παρτίδα αυτή. Η ανάλυση αυτή, πραγματοποιήθηκε μέσω excel, σε τέσσερις περιοχές παραγωγής, χωρίς όμως να δίνεται πολύ έμφαση. Πιο συγκεκριμένα, πηγή μελέτης, αποτέλεσαν τα ■ και ■ έχοντας το μεγαλύτερο όγκο δεδομένων, ενώ παράλληλα και δύο περιοχές, όπου η μία γινόταν αποδεκτή από μια κατανομή, ενώ η άλλη όχι. Οι δύο αυτές περιοχές ήταν αντίστοιχα τα ■ και ■. Η μελέτη αναφέρεται στην κατασκευή διαγραμμάτων, όπου απεικονίζεται ένα σύνολο σημείων. Κάθε σημείο αποτελεί ένα συνδυασμό του χρόνου κύκλου και του αριθμού των επεξεργασιών της παρτίδας. Μετά την κατασκευή των διαγραμμάτων, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης (linear regression) αυτόματα από το excel, με στόχο την παραστατικότερη απεικόνιση της μεταξύ τους σχέσης. Γενικότερα στη στατιστική, η γραμμική παλινδρόμηση αποτελεί μια προσέγγιση για τη μοντελοποίηση της σχέσης μεταξύ μιας βαθμωτής εξαρτημένης μεταβλητής Y και μιας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών X. Στην περίπτωση μας μάλιστα που έχουμε μια ανεξάρτητη

μεταβλητή (με το χρόνο κύκλου να αποτελεί τον άξονα των τετμημένων και τον αριθμό των επεξεργασιών αυτό των τεταγμένων), λέμε ότι πραγματοποιούμε μια απλή γραμμική παλινδρόμηση. Στη γραμμική παλινδρόμηση οι σχέσεις μοντελοποιούνται με τη χρήση γραμμικών συναρτήσεων, των οποίων οι παράμετροι υπολογίζονται από τα δεδομένα. Τέτοια μοντέλα ονομάζονται γραμμικά. Τα γραμμικά παλινδρομικά μοντέλα εφαρμόζονται συνήθως, με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων, αλλά και με άλλους τρόπους. Στα διαγράμματα που ακολουθούν, έχουν εξαιρεθεί οι ακραίες τιμές, με τρόπο τέτοιο, όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως.

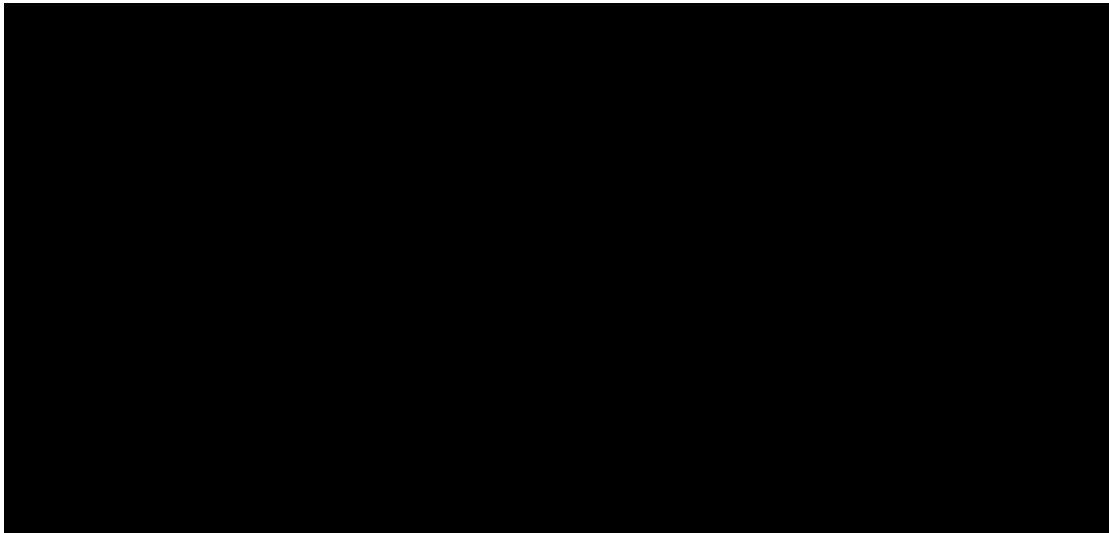
Αρχής γενομένης με την περιοχή █████ το διάγραμμα είναι ως εξής:



Σχήμα 4.10 Διάγραμμα CT-operations για το █████

Το ποσοστό των ακραίων τιμών είναι περίπου █████%. Η προκύπτουσα γραμμή είναι ενδεικτικά, όπως φαίνεται παραπάνω. Από στατιστικό έλεγχο που έγινε, βρέθηκε ότι η μέθοδος που ακολουθήθηκε, δεν είναι στατιστικά αποδεκτή, με το αντίστοιχο p-value να είναι μικρό.

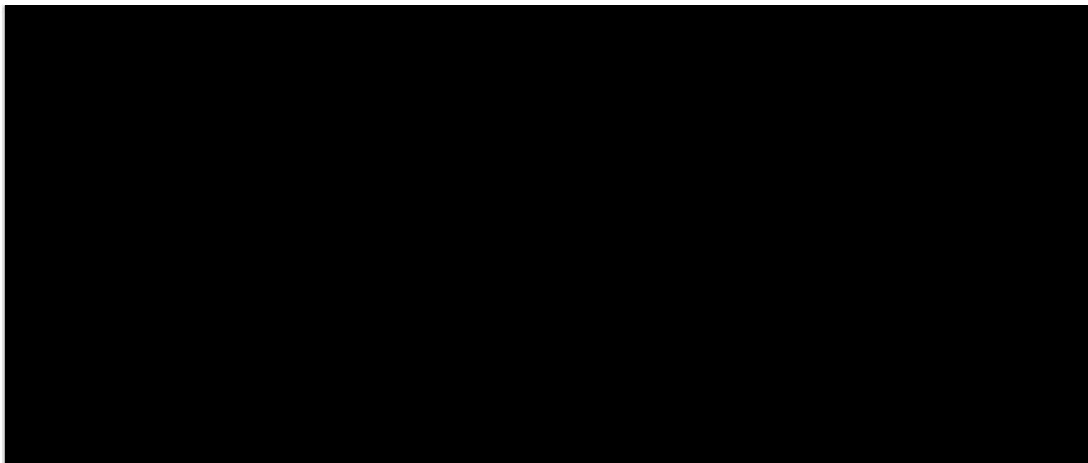
Στη συνέχεια, το διάγραμμα για το █████ είναι:



Σχήμα 4.11 Διάγραμμα CT-operations για το [REDACTED]

Το ποσοστό των ακραίων τιμών είναι στο [REDACTED]%. Ο στατιστικός έλεγχος έδειξε κι εδώ, ότι η γραμμή δεν είναι στατιστικά αποδεκτή. Ενδεικτικά, όμως η γραμμή δείχνεται παραπάνω.

Όσον αφορά το [REDACTED] παρατηρείται, από την προηγούμενη ανάλυση, ότι ορισμένες παρτίδες από τις χιλιάδες που περνούν, μπορεί να σημειώσουν πολύ μεγάλο χρόνο. Επίσης, ένα χαρακτηριστικό, που σχετίζεται με το ιστόγραμμα, είναι ότι στο διάστημα [REDACTED], οι συχνότητες των παρτίδων αυξάνονται. Αυτό σημαίνει ότι για κάποιο λόγο, πολλές παρτίδες σημείωσαν συνολικό χρόνο στο διάστημα αυτό. Επομένως, προκύπτει το εύλογο ερώτημα προς απάντηση και αφορά το λόγο που συνέβη αυτό. Για το [REDACTED] το διάγραμμα που το περιγράφει είναι το εξής:

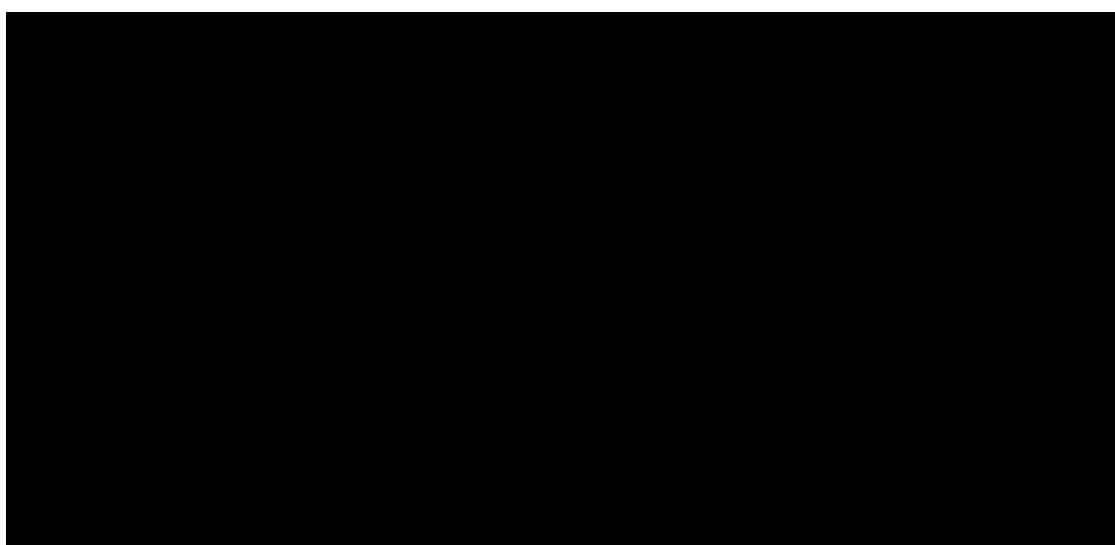


Σχήμα 4.12 Διάγραμμα CT-operations για το [REDACTED]

Το ποσοστό των «outliers» είναι [REDACTED]%. Η προκύπτουσα γραμμή, δεν είναι στατιστικά αποδεκτή, όπως έδειξε ο αντίστοιχος στατιστικός έλεγχος. Παρ' όλα αυτά, δίνεται ενδεικτικά. Όπως παρατηρείται, από το διάγραμμα, για μικρό αριθμό εργασιών,

ο χρόνος κύκλου παραμένει μικρός. Η ανάλογη αυτή σχέση διατηρείται μέχρι το διάστημα [] περίπου, στο χρόνο κύκλου, όπου και σημειώνονται οι παρτίδες με τις περισσότερες εργασίες. Στη συνέχεια όμως, διακρίνεται μια αντιστρόφως ανάλογη σχέση, καθώς όσο αυξάνεται ο χρόνος κύκλου, ο αντίστοιχος αριθμός εργασιών μειώνεται. Συνεπώς, υπάρχουν κάποιες παρτίδες οι οποίες σημειώνουν μεγάλους χρόνους, χωρίς να έχουν κάνει πολλές διαφορετικές επεξεργασίες. Οι παρτίδες αυτές βέβαια, φαίνεται να είναι λιγότερες συγκριτικά με το σύνολό τους, καθώς τα σημεία στο διάστημα αυτό είναι πιο αραιά.

Για το τέλος, παρέχεται του [] το οποίο είναι:



Σχήμα 4.13 Διάγραμμα CT-operations για το []

Το ποσοστό των ακραίων τιμών είναι στο []%. Κι εδώ, από τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης, η γραμμή που προκύπτει δεν είναι σωστή σε στατιστικό έλεγχο που υπεβλήθη. Παρ' όλα αυτά, το αποτέλεσμα που δείχνεται, σχετίζεται με τα προηγούμενα, έχοντας θετική κλίση.

4.4 Συσχετισμός WIP και επιμέρους CT

Με τον όρο Work-In-Process ή WIP στο χώρο της παραγωγής και του μάνατζμεντ εφοδιαστικής αλυσίδας (supply-chain management), εννοούμε τα ημιτελή προϊόντα μέσα στην παραγωγή, δηλαδή αυτά των οποίων η παραγωγή έχει ήδη ξεκινήσει, είναι σε εξέλιξη, αλλά δεν έχει ολοκληρωθεί ακόμη, ώστε να προκύψουν τα τελικά προϊόντα. Για τη βιομηχανία ημιαγωγών, όπως και για κάθε βιομηχανία άλλωστε, το WIP αποτελεί βασικότατο μέτρο απόδοσης και ο έλεγχός του είναι κύρια αρμοδιότητα για να εξασφαλιστεί η αποδοτική και κερδοφόρα λειτουργία της. Σε μια

βιομηχανία με τόσο πολύπλοκες διαδικασίες, μεγάλο πλήθος μηχανημάτων ανά [REDACTED] και σε συνδυασμό με τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις της αγοράς, συναντά κανείς τεράστιους αριθμούς WIP. Η εκτεταμένη μεταβλητότητα των επιμέρους χρόνων των διαδικασιών (CT_i), που αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα της συγκεκριμένης βιομηχανίας, όταν δεν ελέγχεται, έρχεται να εκτοξεύσει το συνολικό CT των παρτίδων και κατά συνέπεια το WIP, όπως προκύπτει και από το νόμο του Little, θεωρώντας σταθερό throughput (TH) ($WIP = TH \cdot CT$). Με τον όρο throughput εννοούμε τον αριθμό των παρτίδων που εξέρχονται από μια περιοχή παραγωγής στη μονάδα του χρόνου. Έτσι, παρατηρούνται φαινόμενα μπλοκαρισμά-των στην παραγωγική διαδικασία, δηλαδή συσσώρευση των παρτίδων που περιμένουν να επεξεργαστούν σε μεγάλες ουρές μπροστά από τα μηχανήματα, γεγονός που καθυστερεί και την έξοδο τελικών προϊόντων στις αγορές και οδηγεί στην αποτυχία τήρησης των προθεσμιών. Η μακροχρόνια διατήρηση εκτεταμένου αριθμού WIP μέσα στις εγκαταστάσεις της βιομηχανίας, αποτελεί σημαντικό πρόβλημα, διότι το WIP έχει μια διαρκώς προστιθέμενη αξία «πάνω του», η οποία θα πρέπει να μετουσιωθεί σε κέρδος από την πώληση του τελικού προϊόντος, το συντομότερο δυνατό. Η αποθήκευση, η μετακίνηση και γενικότερα η μακροχρόνια παραμονή wafers μέσα στις εγκαταστάσεις είναι ένα κόστος που η βιομηχανία επιθυμεί σε κάθε περίπτωση να αποφύγει. Κατανοεί συμπερασματικά κανείς, τη σπουδαιότητα και τον καθοριστικό ρόλο που διαδραματίζει για τη βιομηχανία ημιαγωγών το WIP, κάτι που αποτέλεσε και βασικό λόγο για την ενασχόληση μας με το συγκεκριμένο μέτρο απόδοσης και τη σχέση του με το CT των παρτίδων στο κάθε [REDACTED]

4.4.1 Καταγραφή δεδομένων για υπολογισμό WIP

Σε αυτό το τμήμα της διπλωματικής προσπαθήσαμε να μετρήσουμε, από τα αρχεία που λάβαμε από τη [REDACTED] το WIP των 9 κυριότερων [REDACTED] του [REDACTED] κατά τη διάρκεια του πρώτου μισού του [REDACTED] ([REDACTED]) του [REDACTED] και όχι ολόκληρου λόγω περιορισμένου χώρου του excel. Η καταμέτρηση πραγματοποιήθηκε ανά [REDACTED]. Αναλυτικότερα, για κάθε παρτίδα που χρονικά εισήλθε από 1-15 του μηνός, μετρήθηκε ο αριθμός των παρτίδων, η επεξεργασία των οποίων βρίσκονταν ήδη σε εξέλιξη στο συγκεκριμένο [REDACTED]. Αυτό σημαίνει ότι, δεν είχε ολοκληρωθεί η συνολική τους επεξεργασία, τη στιγμή που ξεκίνησε η διαδικασία αναμονής της παρτίδας για την πρώτη της επεξεργασία. Με άλλα λόγια, μετρήθηκε για κάθε παρτίδα ο αριθμός των «σε επεξεργασία παρτίδων» που «είδε»

αυτή μπροστά της, ακριβώς τη στιγμή που ξεκίνησε να περιμένει την πρώτη επεξεργασία της (██████████). Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργούμε έναν πίνακα WIP, όπου δίπλα από κάθε παρτίδα, που μπήκε για επεξεργασία σε ένα ██████████ αναγράφεται ένας αριθμός που δηλώνει αυτό που περιγράψαμε ακριβώς πιο πάνω.

Αν και ο πίνακας WIP, όπως προαναφέρθηκε, δημιουργήθηκε μόνο για παρτίδες που ξεκίνησαν χρονικά να περιμένουν για την πρώτη τους επεξεργασία στο διάστημα ██████████ (και για την ακρίβεια ██████████ και 00:00 έως και ██████████ και 23:59), εντούτοις ελήφθησαν υπόψη, παρτίδες με έναρξη αναμονής για την πρώτη τους επεξεργασία, χρονικά και πριν τη ██████████ (██████████ < ██████████ 00:00). Αυτό συνέβη γιατί, συνυπήρξαν, χρονικά τουλάχιστον, με κάποιες από τις παρτίδες ██████████ με ██████████ και άρα επηρέασαν το WIP τους. Με άλλα λόγια η πρώτη παρτίδα που μπήκε για επεξεργασία σε ένα ██████████, δε ξεκίνησε «βλέποντας» μπροστά της μηδενικό WIP, αλλά ορισμένες παρτίδες. Ασφαλώς, καλό είναι να επισημανθεί ξανά σε αυτό το σημείο, το γεγονός ότι στο κομμάτι ██████████ με ██████████ του excel, περιέχονται μόνο παρτίδες, που χρονικά ξεκίνησαν να επεξεργάζονται εντός αυτού του χρονικού ορίζοντα (██████████ 00:00 ≤ ██████████ ≤ ██████████ 08:33) και μάλιστα αυτό ισχύει και για τις παρτίδες που ξεκίνησαν να περιμένουν για την επεξεργασία τους αρκετές μέρες, ακόμη και χρόνια, πριν τη ██████████ 00:00. Αυτό σημαίνει πως ένας αριθμός παρτίδων με «██████████ < ██████████ 00:00» βρίσκεται ακόμη στο εργοστάσιο (είναι σε εξέλιξη η επεξεργασία τους), για τουλάχιστον κάποιες από τις ██████████ μέρες που μελετάμε, ωστόσο δεν καταγράφονται στα δοθέντα αρχεία και δεν προσμετρούνται ως WIP. Το γεγονός αυτό, είναι δυνατό να μας οδηγήσει ως ένα βαθμό σε αποκλίνοντα αποτελέσματα, σε σχέση με την πραγματικότητα. Αντίστοιχα, στο δεύτερο αρχείο excel περιέχονται μόνο παρτίδες που ξεκίνησαν να επεξεργάζονται από τις «██████████ 00:00» έως και «██████████ 15:01». Ένα ακόμη στοιχείο που οφείλει να διευκρινιστεί, αποτελεί το γεγονός ότι, το μοναδικό κριτήριο καταγραφής των παρτίδων σε ένα από τα δύο δοθέντα αρχεία excel, είναι η χρονική κατάταξη της ██████████ και όχι το πότε θα τελειώσουν την επεξεργασία τους οι παρτίδες (██████████).

Τα ██████████, για τα οποία πραγματοποιήθηκε η καταμέτρηση του WIP αναλυτικά είναι τα εξής: ██████████ (██████████), ██████████ (██████████t), ██████████ (██████████), ██████████ (██████████), ██████████ (██████████), ██████████ (██████████), ██████████ (██████████), ██████████ (██████████) και ██████████ (██████████). Αρχικά, δημιουργήθηκαν 9 αρχεία σε κάθε ένα από τα οποία καταγράφηκαν: όλες οι παρτίδες που ξεκίνησαν να αναμένουν την έναρξη της

επεξεργασίας τους, από «[REDACTED] 00:00» μέχρι «[REDACTED] 23:59», με όλες τις επεξεργασίες τους, αναλυτικά στο εκάστοτε [REDACTED]. Επίσης, σημειώθηκαν η στήλη [REDACTED] και η χρονική στιγμή που σήμανε το τέλος της επεξεργασίας τους. Σε αυτό το σημείο να τονίσουμε ότι, καταγράφηκαν και από το δεύτερο excel επεξεργασίες παρτίδων με [REDACTED] στις [REDACTED], οι οποίες για κάποιο λόγο δεν είχαν συμπεριληφθεί στο πρώτο. Δημιουργήσαμε μια ακόμη στήλη, την «[REDACTED]», στην οποία περιέχονταν οι επιμέρους χρόνοι κύκλου για την κάθε επεξεργασία των παρτίδων, όπου συνυπολογίζεται ο χρόνος που η παρτίδα μεταφερόταν και περίμενε για την επικείμενη επεξεργασία της και ο χρόνος επεξεργασίας της (processing time). Υπολογίστηκε η διαφορά «[REDACTED] | [REDACTED]» πολλαπλασιασμένη κατά 24. Με αυτόν τον τρόπο, ήμαστε σε θέση να εξαιρέσουμε από τους υπολογισμούς τις επεξεργασίες με μηδενικό χρόνο επεξεργασίας, με το σκεπτικό είτε ότι ήταν πολύ σύντομες είτε ότι δεν έγιναν ποτέ και υπήρξε λάθος κατά την καταγραφή τους. Έπειτα, κατατάξαμε τα δεδομένα πρώτον (πρώτη προτεραιότητα) κατά [REDACTED] και δεύτερον κατά [REDACTED] από το παλαιότερο προς το νεότερο. Έτσι αντιγράψαμε σε ένα δεύτερο φύλλο του excel τα καταταγμένα operations και, αφαιρώντας τα διπλότυπα, μας έμεινε στο φύλλο αυτό μια φορά η κάθε παρτίδα που μπήκε στο εκάστοτε [REDACTED] και η πρώτη φορά που χρονικά μπήκε για επεξεργασία. Στη συνέχεια, ταξινομώντας το πρώτο φύλλο ξανά πρώτον κατά [REDACTED] και δεύτερον κατά [REDACTED] από το νεότερο προς το παλαιότερο και πραγματοποιώντας την ίδια διαδικασία με προηγουμένως, κατορθώσαμε να προσθέσουμε σε μια τρίτη στήλη στο δεύτερο φύλλο του excel, τη χρονική στιγμή που η κάθε παρτίδα τελείωσε και την τελευταία της επεξεργασία στο συγκεκριμένο [REDACTED]. Έπειτα, με κατάλληλη εφαρμογή της συνάρτησης “sumif” του excel, υπολογίστηκε το συνολικό CT της παρτίδας στο [REDACTED] ως το άθροισμα των N επιμέρους βημάτων επεξεργασίας της παρτίδας στην εν λόγω περιοχή. Σε αυτό το σημείο ήταν απαραίτητο να καταταχθούν οι παρτίδες κατά [REDACTED]. Πλέον, διαθέτοντας και το συνολικό CT κάθε παρτίδας, ήμασταν έτοιμοι να προχωρήσουμε στον υπολογισμό του WIP που «βλέπει» μπροστά της με την είσοδό της στο [REDACTED], με στόχο το συσχετισμό του με το CT.

Αρχικά, τα δεδομένα των αρχείων που δημιουργήσαμε, περάστηκαν στη matlab. Γράφθηκε κατάλληλος κώδικας σε matlab, ο οποίος και παρατίθεται αναλυτικά

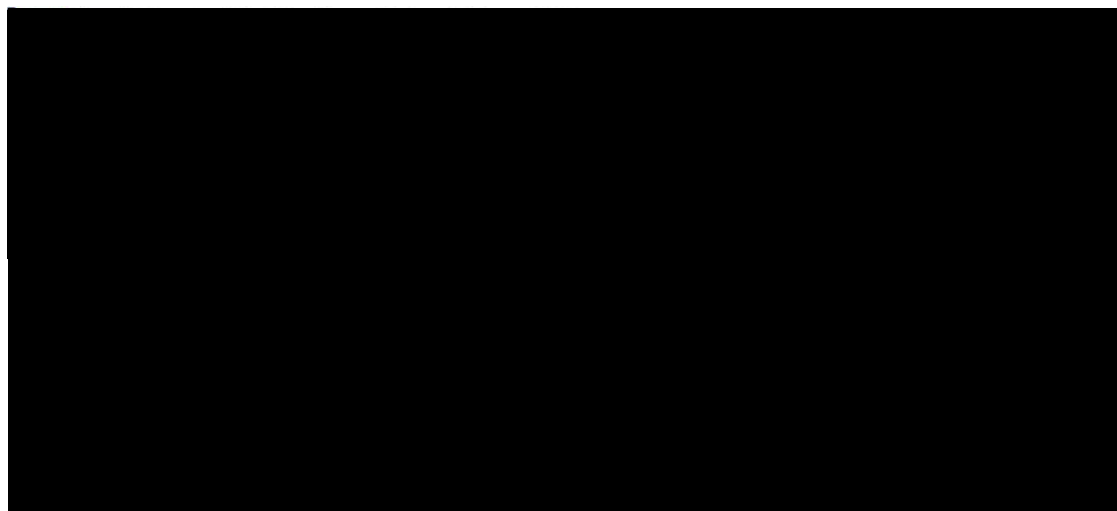
στο τελευταίο κομμάτι της διπλωματικής εργασίας και υπολογίζει για κάθε παρτίδα που ξεκίνησε να περιμένει για την επεξεργασία της, το WIP που «είδε» μπροστά της στο συγκεκριμένο [REDACTED]. Με αυτόν τον τρόπο, φτιάχνεται ένα άθροισμα για κάθε παρτίδα και δημιουργείται ένας πίνακας WIP για κάθε [REDACTED] και για τον προαναφερόμενο χρονικό ορίζοντα. Ο κώδικας στη matlab λειτούργησε άψογα στα [REDACTED] [REDACTED] με λιγότερα δεδομένα, ήταν ωστόσο πρακτικά αδύνατο να λειτουργήσει κάποια με τεράστιο όγκο δεδομένων. Έτσι, χρησιμοποιήθηκε η εντολή “countif” στο excel και με κατάλληλη μορφοποίηση των “datetimes”, κατορθώσαμε να δημιουργήσουμε τον πίνακα WIP και για τα μεγάλα [REDACTED]. Η λογική με την οποία λειτούργησε η μέθοδος στο excel ταυτίζεται με αυτήν του κώδικα και επιτυγχάνεται, συγκρίνοντας την [REDACTED] κάθε παρτίδας με τις Trackouttime όλων των προηγούμενων [προηγούμενες εννοώντας ότι ξεκίνησαν να περιμένουν την έναρξη της επεξεργασίας τους χρονικά πιο πριν, θυμίζουμε ότι οι παρτίδες είναι καταταγμένες χρονικά όσον αφορά την Queue time]. Παραθέτουμε το εξής παράδειγμα με στόχο την καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού που πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί. Έστω ότι έχουμε δύο παρτίδες, την «[REDACTED]» και την «[REDACTED]», η οποία ξεκινά πιο ύστερα να περιμένει στην ουρά για την επεξεργασία της (έχει μεγαλύτερη [REDACTED] από την πρώτη). Αν η «[REDACTED]» δεν έχει προλάβει να τελειώσει τη συνολική επεξεργασία της στο [REDACTED] μέχρι να μπει στην ουρά η «[REDACTED]» (δηλαδή η [REDACTED] της «[REDACTED]» είναι μεγαλύτερη της [REDACTED] της «[REDACTED]»), τότε η «[REDACTED]» προσμετράται ως WIP για την «[REDACTED]». Σε αντίθετη περίπτωση ή σε περίπτωση ισοπαλίας (με το που τελειώσει η μια παρτίδα ξεκινά η άλλη) δεν προσμετράται το WIP.

Εδώ οφείλουμε βέβαια να τονίσουμε ότι, κώδικας matlab και excel έδωσαν κοινά αποτελέσματα (εφαρμόστηκαν και σε ίδια [REDACTED] τα οποία είναι και με ακρίβεια σωστά.

4.4.3 Κατασκευή διαγραμμάτων WIP-CT

Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργήθηκαν 9 αρχεία excel, ένα για κάθε [REDACTED] [REDACTED]. Στην πρώτη στήλη αναγράφεται η παρτίδα, στη δεύτερη η χρονική στιγμή που ξεκίνησε να περιμένει για να υποστεί την πρώτη της επεξεργασία, στην τρίτη η χρονική στιγμή που ολοκληρώθηκε η τελευταία της επεξεργασία, στην τέταρτη ο πίνακας WIP που δημιουργήθηκε και στην πέμπτη το συνολικό CT της παρτίδας. Ακολουθεί εικόνα

από το [REDACTED], όπου φαίνονται τα δεδομένα που περιεγράφηκαν προηγουμένως:



Σχήμα 4 14 Δεδομένα προς απεικόνιση από το [REDACTED]

Τα δεδομένα είναι ταξινομημένα, όπως έχει ξεκαθαριστεί, κατά [REDACTED] και οι γραμμές βρίσκονται σε πλήρη αντιστοιχία. Πολύ απλά στη συνέχεια, μαρκάραμε τις επιθυμητές στήλες WIP και Time In [REDACTED] (CT), προκειμένου να κατασκευαστούν τα διαγράμματα WIP-CT. Είναι προφανές ότι, κάθε σημείο του διαγράμματος διασποράς που κατασκευάστηκε, αποτελεί ένα ζεύγος WIP και CT που αντιστοιχεί στην κάθε παρτίδα.

Έτσι, σχεδιάστηκαν τα 9 διαγράμματα WIP-CT για τα [REDACTED]. Παρατηρήθηκε ωστόσο, μεγάλη διασπορά στα σημεία όσον αφορά στον άξονα y, ο οποίος περιέχει τα cycle time των παρτίδων. Ανατρέχοντας στη στήλη των CT, μπορεί κανείς να ανιχνεύσει πως η διάρκεια επεξεργασίας των παρτίδων σε όλα τα [REDACTED] έχει διαρκέσει από αρκετές μέρες, μέχρι και ολόκληρους μήνες. Ορισμένες από τις τιμές που σημείωσαν μεγάλο χρόνο, θεωρήθηκαν ως ακραίες και εξαιρέθηκαν, με αυθαίρετο τρόπο, όπως συνέβη στις προηγούμενες παραγράφους. Για κάθε [REDACTED] αναγράφεται το πλήθος των outlier που δεν ελήφθησαν υπόψη, από πόσο CT και πάνω ίσχυσαν οι παραβλέψεις και το ποσοστό των δεδομένων που συμμετείχε στο διάγραμμα τελικά.

Τα διαγράμματα WIP-CT δεν είναι ωστόσο, τα μόνα που δημιουργήθηκαν σε αυτό το σκέλος της διπλωματικής. Για κάθε [REDACTED] παρατίθεται και ένα διάγραμμα όπου στον άξονα x βρίσκεται η στήλη [REDACTED] e (δηλαδή τυπικά έχουμε τον χρονικό ορίζοντα) για τις παρτίδες που ξεκίνησαν να αναμένουν την πρώτη

εργασία τους από [REDACTED] 00:00 μέχρι και [REDACTED] 23:59 και στον άξονα y υπάρχει ο πίνακας WIP (αντίστοιχα το WIP που «είδαν» μπροστά τους τη στιγμή [REDACTED]). Ουσιαστικά, πρόκειται για διαγράμματα τα οποία απεικονίζουν τη μεταβολή του WIP στην κάθε περιοχή μέσα στο χρονικό ορίζοντα αυτών των [REDACTED] ημερών. Στόχος ήταν να δειχθεί στο πέρασμα ενός χρονικού διαστήματος, πως μεταβάλλεται το WIP στην κάθε περιοχή και να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα αν αυτό το ύψος του WIP μπορεί να δημιουργήσει μπλοκαρίσματα, καθυστερήσεις στην παραγωγή και, κατά συνέπεια, καθυστερήσεις στις προθεσμίες. Εντούτοις, κρίνεται σκόπιμο σε αυτό το σημείο να υπενθυμιστεί ξανά το γεγονός ότι, το ΑΠ εικονιζόμενο WIP δεν αντικατοπτρίζει πλήρως την πραγματικότητα, δεδομένου ότι ένας αριθμός παρτίδων που ξεκίνησε την επεξεργασία του πριν τις [REDACTED] 00:00 και συνέχισε να βρίσκεται μέσα στο εργοστάσιο έστω για ένα διάστημα του εν λόγω χρονικού διαστήματος, δεν συμπεριλήφθηκε στα δεδομένα και δεν καταμετρήθηκε. Επίσης, στα διαγράμματα αυτά, συμπεριλαμβάνονται τα outlier που δεν ελήφθησαν υπόψη στην πρώτη κατηγορία διαγραμμάτων (WIP-CT). Τέλος και πριν παρουσιαστούν τα διαγράμματα, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης (linear regression), αυτόματα από το excel με στόχο την παραστατικότερη απεικόνιση της σχέσης του WIP με το CT.

Όσον αφορά στα διαγράμματα Time-WIP, χρησιμοποιήθηκε και εδώ η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης, ώστε να μπορεί να προβλεφθεί για δεδομένη χρονική στιγμή το WIP σε μια περιοχή παραγωγής. Ουσιαστικά, προσεγγίζουμε τα διαγράμματα διασποράς που προκύπτουν με μια ευθεία εξίσωσης:

$$y = b_0 + b_1x$$

Στα τεστ που πραγματοποιήθηκαν, προκειμένου να καταλάβουμε αν υπάρχει κάποια γραμμική συσχέτιση των δύο μεγεθών, θεωρούμε ως μηδενική υπόθεση (null hypothesis) πως δεν υπάρχει γραμμικότητα ($b_0=0$). Για διάστημα εμπιστοσύνης [REDACTED]%, το p-value του τεστ πρέπει να είναι μικρότερο από 0.05 (alpha level), για υπάρξει γραμμική συσχέτιση. Για το στατιστικό έλεγχο σημαντικά μεγέθη είναι και τα ακόλουθα.

- **Πολλαπλό R (multiple R):** Συντελεστής συσχέτισης που μετρά πόσο καλά ομαδοποιούνται τα δεδομένα γύρω από τη γραμμή παλινδρόμησης. Όσο πιο κοντά είναι η τιμή του στο 1, τόσο γραμμικότερη σχέση έχουμε.

- **R²:** Συντελεστής μέτρησης του ποσοστού της απόκλισης της εξαρτημένης μεταβλητής από τη γραμμή παλινδρόμησης. Όσο μεγαλύτερη τιμή παίρνουμε για το R², τόσο μεγαλύτερο ποσοστό των δεδομένων σχετίζεται γραμμικά.

Ακολουθούν, λοιπόν, τα διαγράμματα WIP-CT και TIME-WIP για τα 9 βασικά [redacted] της [redacted] στο χρονικό διάστημα [redacted] 00:00-[redacted] 23:59.

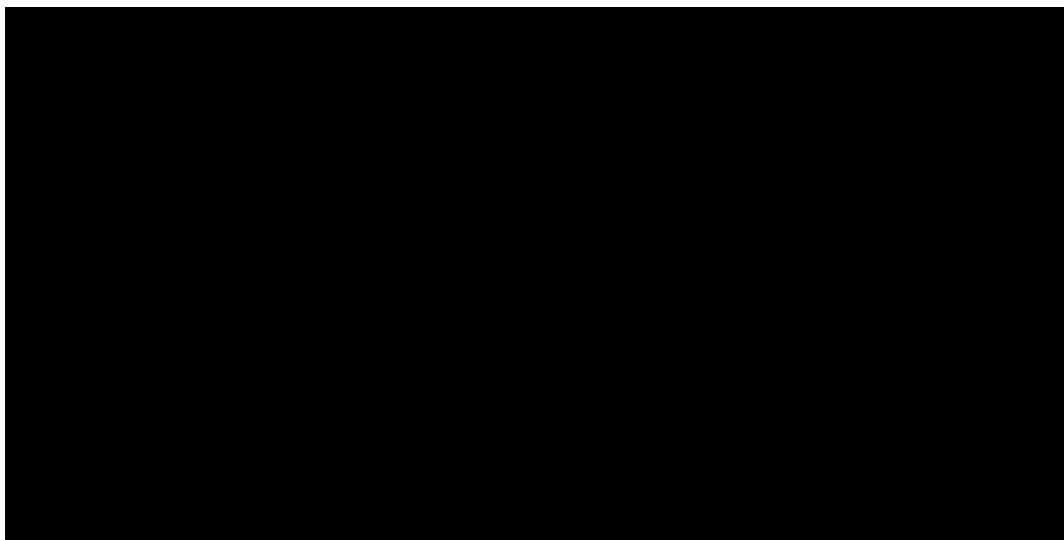
4.4.4 Διαγράμματα WIP-CT και QUEUE TIME-WIP

➤ [redacted] ([redacted])



Σχήμα 4.15 Διάγραμμα WIP-CT για το [redacted]

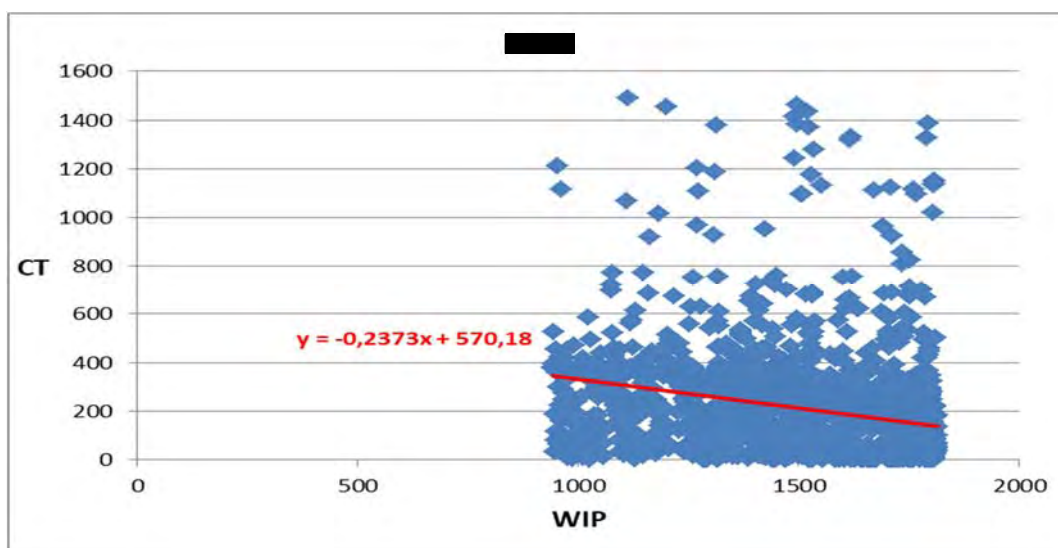
Το [redacted] περιείχε ένα δείγμα [redacted] παρτίδων, εκ των οποίων ελήφθη υπόψη ένα ποσοστό [redacted]%, επειδή [redacted] παρτίδες διαγράφηκαν ως outlier και είχαν CT>[redacted] ώρες.



Σχήμα 4.16 Διάγραμμα Time-WIP για το [redacted]

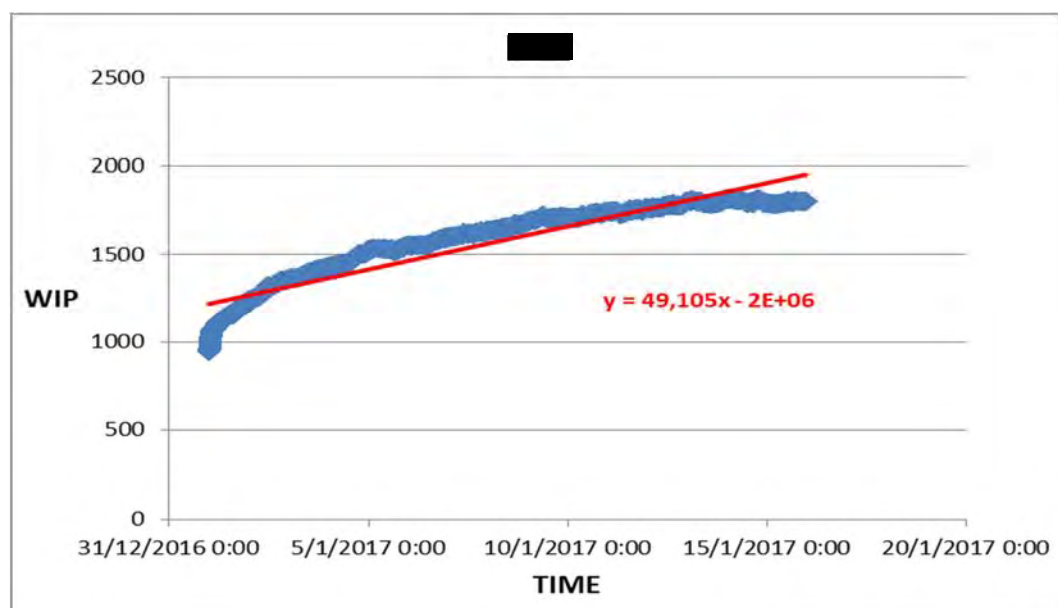
Από το στατιστικό έλεγχο που πραγματοποιήθηκε στο [REDACTED] προέκυψε $p\text{-value}=0$ και αφού είναι μικρότερο του 0.05 (alpha level), απορρίπτεται η αρχική υπόθεση ότι δεν υπάρχει γραμμική συσχέτιση. Οι τιμές ενδιαφέροντός μας είναι $R=0.9123$ και $R^2=0.8324$, δηλαδή ένα 83.24% των δεδομένων σχετίζεται γραμμικά, σύμφωνα με το τεστ.

➤ [REDACTED] ([REDACTED])



Σχήμα 4.17 Διάγραμμα WIP-CT για το [REDACTED]

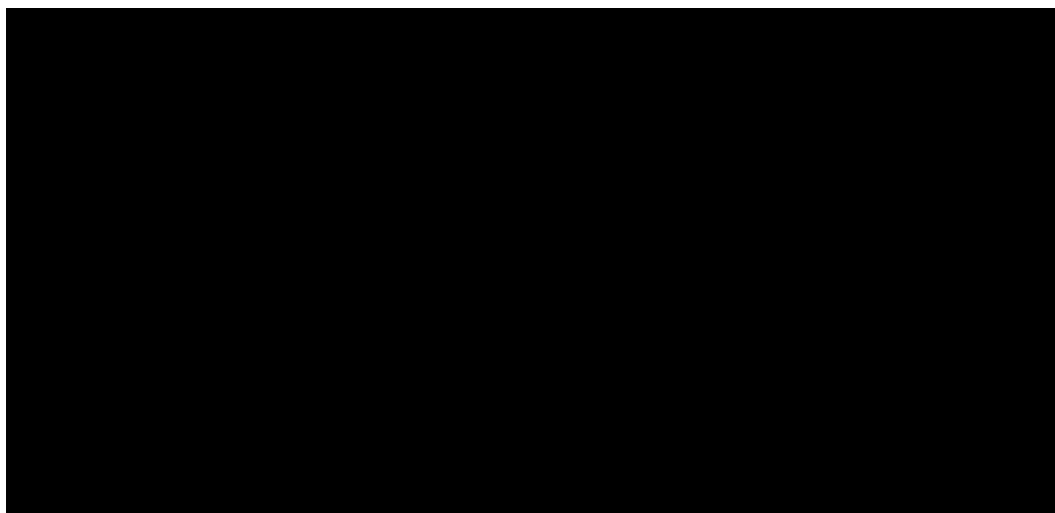
Το [REDACTED] περιείχε ένα δείγμα [REDACTED] παρτίδων, εκ των οποίων ελήφθη υπόψη ένα ποσοστό [REDACTED]%, επειδή [REDACTED] παρτίδες διαγράφηκαν ως outlier και είχαν $CT > [REDACTED]$ ώρες.



Σχήμα 4.18 Διάγραμμα Time-WIP Για το [REDACTED]

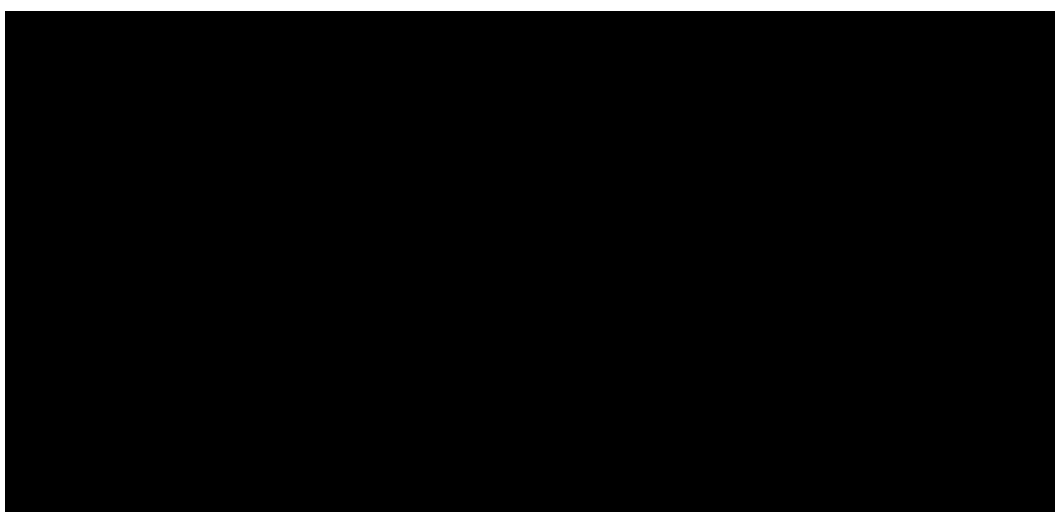
Από το στατιστικό έλεγχο που πραγματοποιήθηκε στο [REDACTED] προέκυψε $p\text{-value}=[REDACTED]$ και αφού είναι μικρότερο του 0.05 (alpha level), απορρίπτεται η αρχική υπόθεση ότι δεν υπάρχει γραμμική συσχέτιση. Οι τιμές ενδιαφέροντός μας είναι $R=0.9339$ και $R^2=0.8721$, δηλαδή ένα [REDACTED]% των δεδομένων σχετίζεται γραμμικά, σύμφωνα με το τεστ.

➤ [REDACTED] ([REDACTED])



Σχήμα 4.19 Διάγραμμα WIP-CT για το [REDACTED]

Το [REDACTED] περιείχε ένα δείγμα [REDACTED] παρτίδων, εκ των οποίων ελήφθη υπόψη ένα ποσοστό [REDACTED]%, αφού 14 παρτίδες διαγράφηκαν (λόγω των CT τους) ως outlier και αυτές είχαν $CT > [REDACTED]$ ώρες.

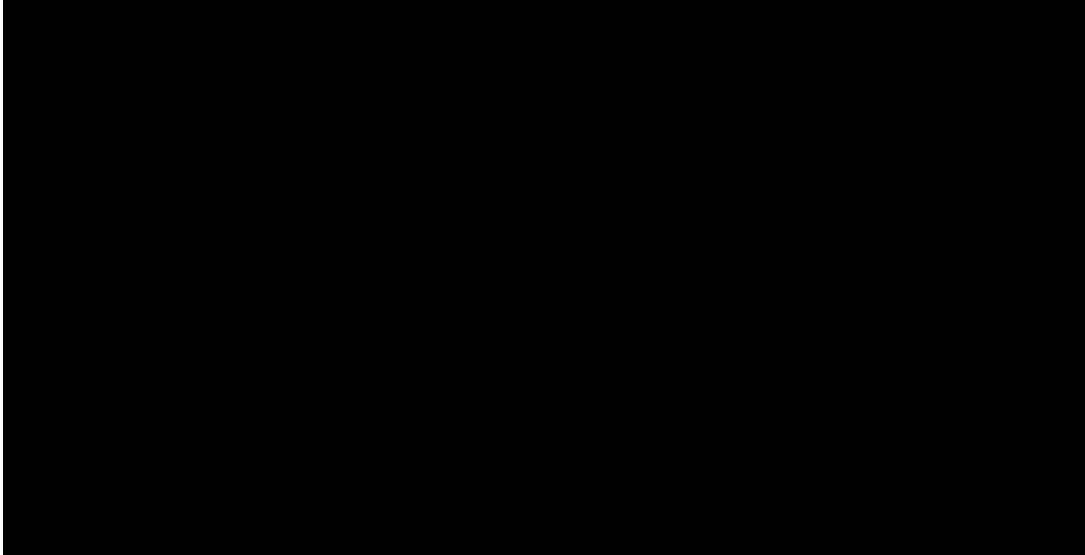


Σχήμα 4.20 Διάγραμμα Time-WIP για το [REDACTED]

Από το στατιστικό έλεγχο που πραγματοποιήθηκε στο [REDACTED] προέκυψε $p\text{-value}=[REDACTED]^1$ και αφού είναι μικρότερο του 0.05 (alpha level), απορρίπτεται η αρχική υπόθεση ότι δεν υπάρχει γραμμική συσχέτιση. Οι τιμές ενδιαφέροντός μας είναι

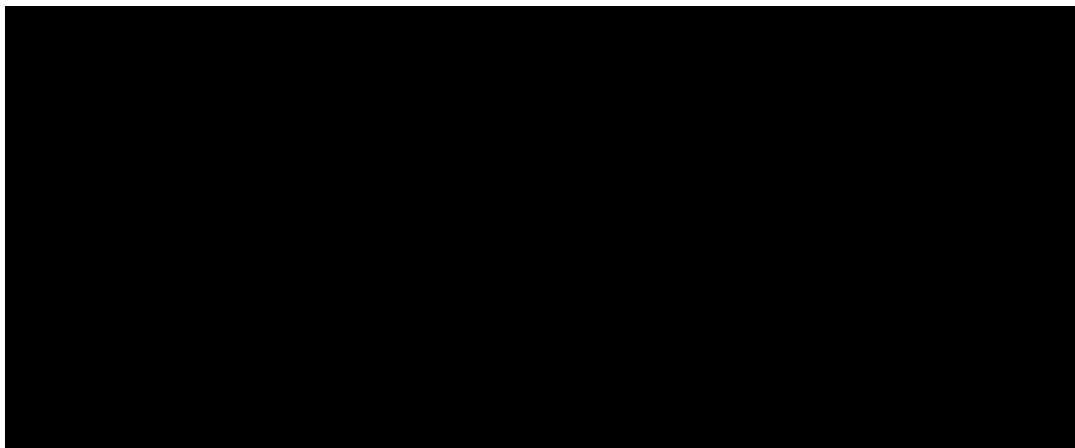
$R=0.6368$ και $R^2=0.4055$, δηλαδή ένα █████% των δεδομένων σχετίζεται γραμμικά, σύμφωνα με το τεστ.

➤ █████ (█████)



Σχήμα 4.21 Διάγραμμα WIP-CT για το █████

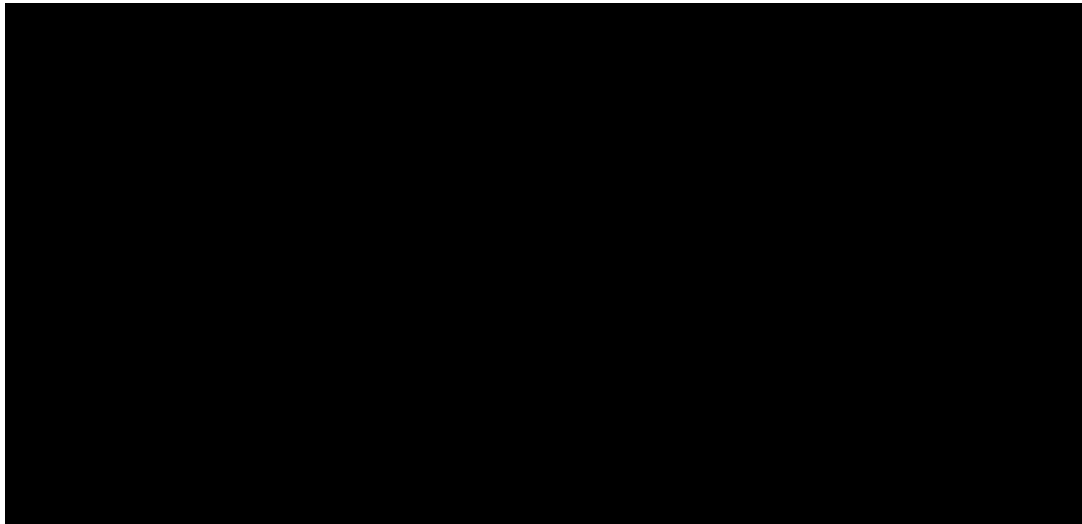
Το █████ περιείχε ένα δείγμα █████ παρτίδων, εκ των οποίων ελήφθη υπόψη ένα ποσοστό █████%, γιατί █████ επεξεργασίες διαγράφηκαν ως outlier και είχαν CT>█████ ώρες.



Σχήμα 4 22 Διάγραμμα Time-WIP για το █████

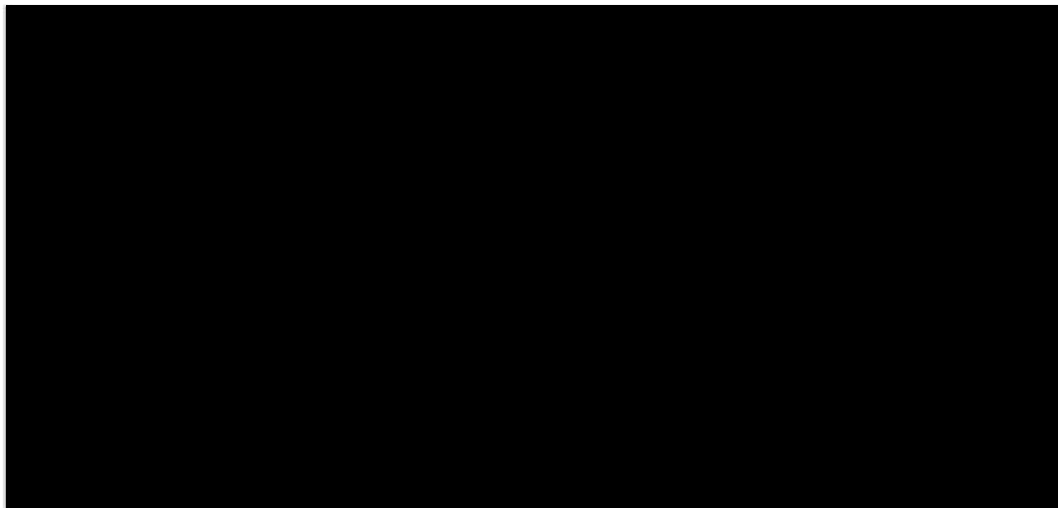
Από το στατιστικό έλεγχο που πραγματοποιήθηκε στο █████ προέκυψε $p\text{-value}=0$ και αφού είναι μικρότερο του 0.05 (alpha level), απορρίπτεται η αρχική υπόθεση ότι δεν υπάρχει γραμμική συσχέτιση. Οι τιμές ενδιαφέροντός μας είναι $R=0.8747$ και $R^2=0.7652$, δηλαδή ένα █████% των δεδομένων σχετίζεται γραμμικά, σύμφωνα με το τεστ.

➤ █████ (█████)



Σχήμα 4.23 Διάγραμμα WIP-CT για το [redacted]

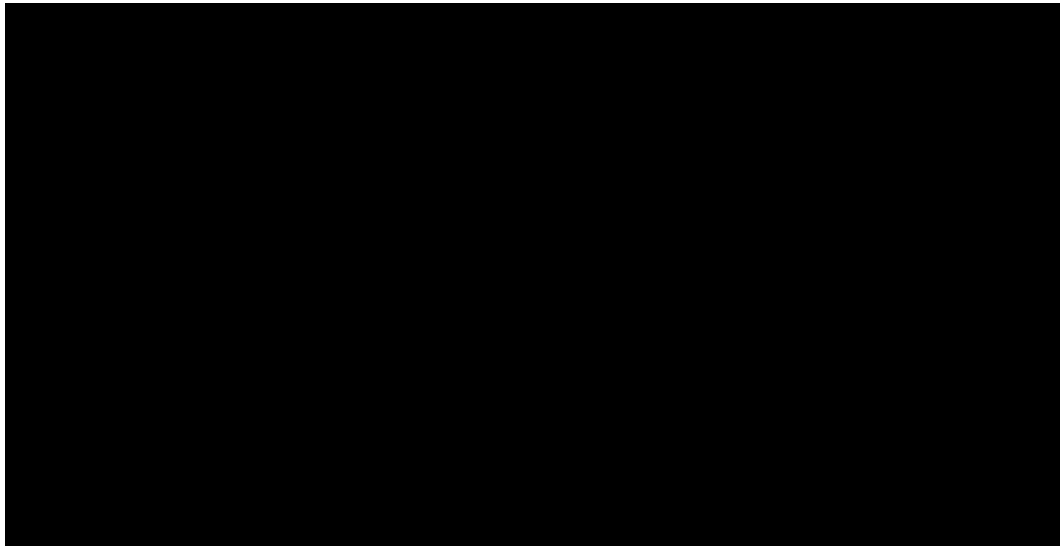
Το [redacted] περιείχε ένα δείγμα [redacted] παρτίδων, εκ των οποίων ελήφθη υπόψη ένα ποσοστό [redacted]%, γιατί [redacted] παρτίδες διαγράφηκαν ως outlier και είχαν CT>[redacted] ώρες.



Σχήμα 4.24 Διάγραμμα Time-WIP για το [redacted]

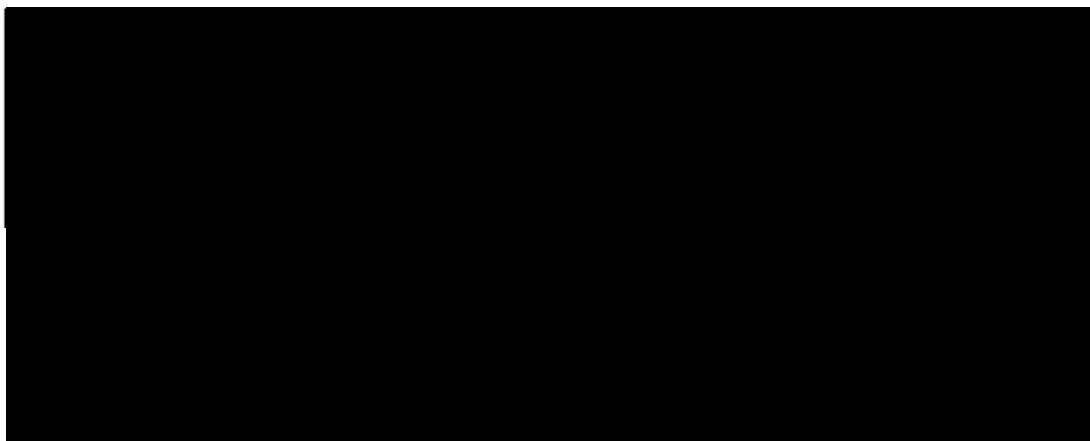
Από το στατιστικό έλεγχο που πραγματοποιήθηκε στο [redacted] προέκυψε p-value=7[redacted] και αφού είναι μικρότερο του 0.05 (alpha level), απορρίπτεται η αρχική υπόθεση ότι δεν υπάρχει γραμμική συσχέτιση. Οι τιμές ενδιαφέροντός μας είναι $R=0.7959$ και $R^2=0.6335$, δηλαδή ένα [redacted]% των δεδομένων σχετίζεται γραμμικά, σύμφωνα με το τεστ.

➤ [redacted] ([redacted])



Σχήμα 4.25 Διάγραμμα WIP-CT για το [REDACTED]

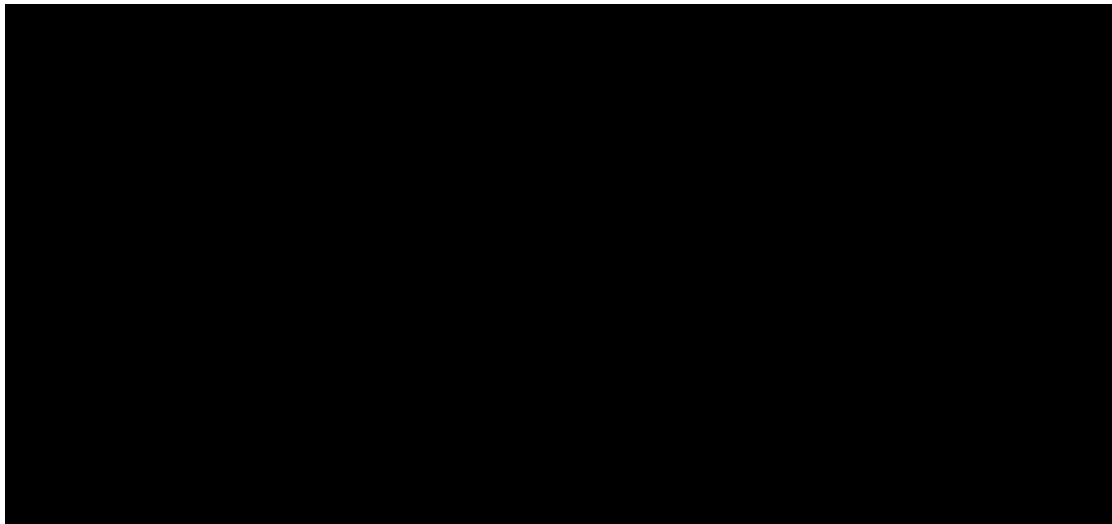
Το [REDACTED] περιείχε ένα δείγμα [REDACTED] παρτίδων, εκ των οποίων ελήφθη υπόψη ένα ποσοστό [REDACTED]%, γιατί [REDACTED] παρτίδες διαγράφηκαν ως outlier και είχαν CT>[REDACTED] ώρες.



Σχήμα 4.26 Διάγραμμα Time-WIP για το [REDACTED]

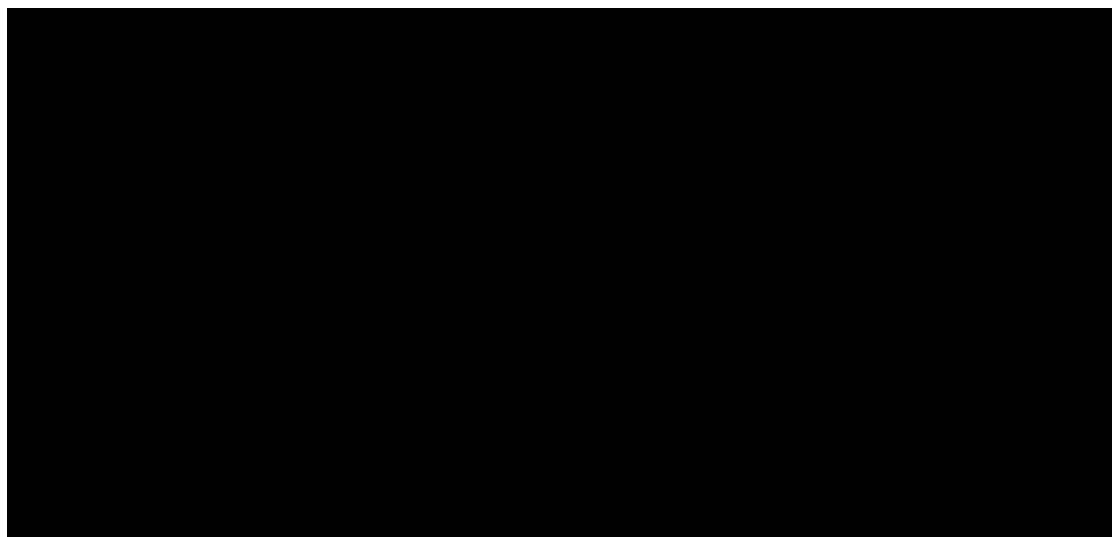
Από το στατιστικό έλεγχο που πραγματοποιήθηκε στο [REDACTED] προέκυψε p-value=[REDACTED] και αφού είναι μικρότερο του 0.05 (alpha level), απορρίπτεται η αρχική υπόθεση ότι δεν υπάρχει γραμμική συσχέτιση. Οι τιμές ενδιαφέροντός μας είναι $R=0.9579$ και $R^2=0.9176$, δηλαδή ένα [REDACTED]% των δεδομένων σχετίζεται γραμμικά, σύμφωνα με το τεστ.

➤ [REDACTED] ([REDACTED])



Σχήμα 4.27 Διάγραμμα WIP-CT για το [REDACTED]

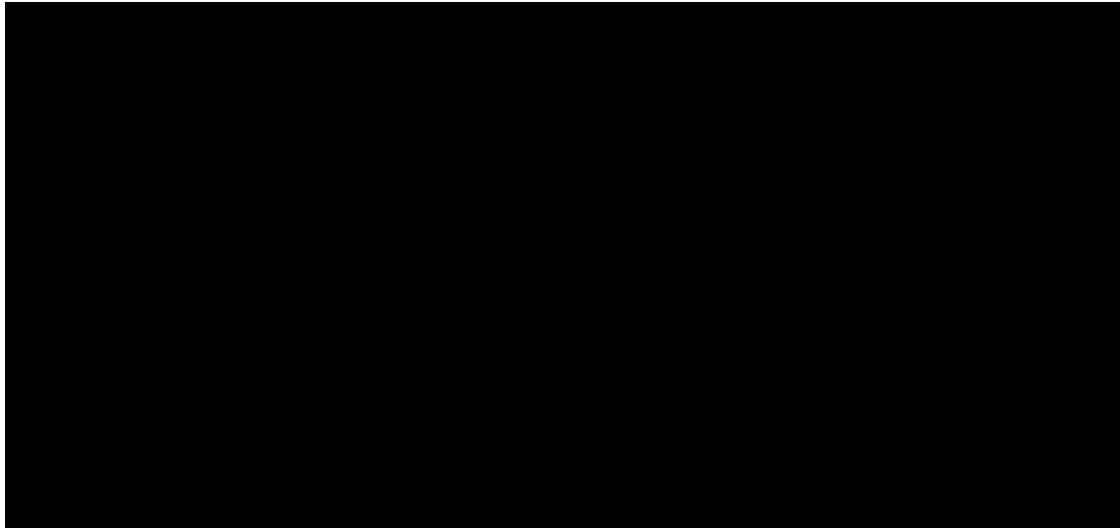
Το [REDACTED] περιείχε ένα δείγμα [REDACTED] παρτίδων, εκ των οποίων ελήφθη υπόψη ένα ποσοστό [REDACTED]%, αφού [REDACTED] παρτίδες διαγράφηκαν ως outlier και είχαν CT>[REDACTED] ώρες.



Σχήμα 4.28 Διάγραμμα Time-WIP για το [REDACTED]

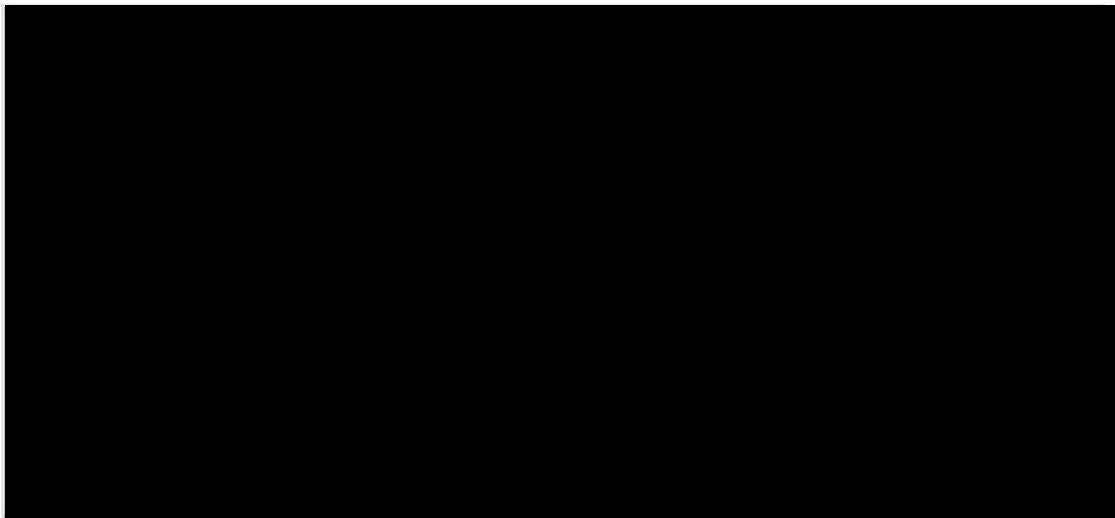
Από το στατιστικό έλεγχο που πραγματοποιήθηκε στο [REDACTED] προέκυψε p-value=[REDACTED] και αφού είναι μικρότερο του 0.05 (alpha level), απορρίπτεται η αρχική υπόθεση ότι δεν υπάρχει γραμμική συσχέτιση. Οι τιμές ενδιαφέροντός μας είναι $R=0.8749$ και $R^2=0.7655$, δηλαδή ένα [REDACTED]% των δεδομένων σχετίζεται γραμμικά, σύμφωνα με το τεστ.

➤ [REDACTED] ([REDACTED])



Σχήμα 4.29 Διάγραμμα WIP-CT για το [REDACTED]

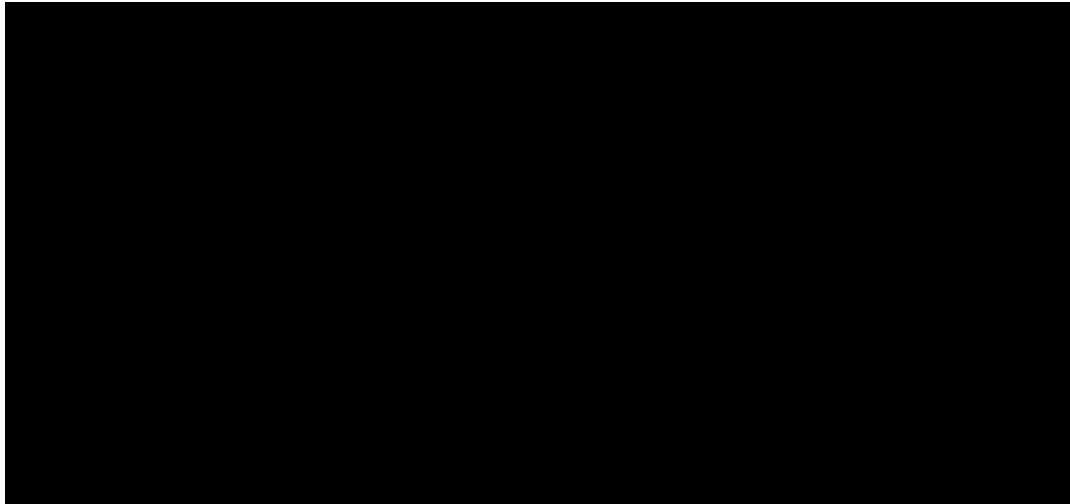
Το [REDACTED] περιείχε ένα δείγμα [REDACTED] παρτίδων, εκ των οποίων ελήφθη υπόψη ένα ποσοστό [REDACTED]%, αφού [REDACTED] παρτίδες διαγράφηκαν ως outlier και είχαν CT>[REDACTED] ώρες.



Σχήμα 4.30 Διάγραμμα Time-WIP για το [REDACTED]

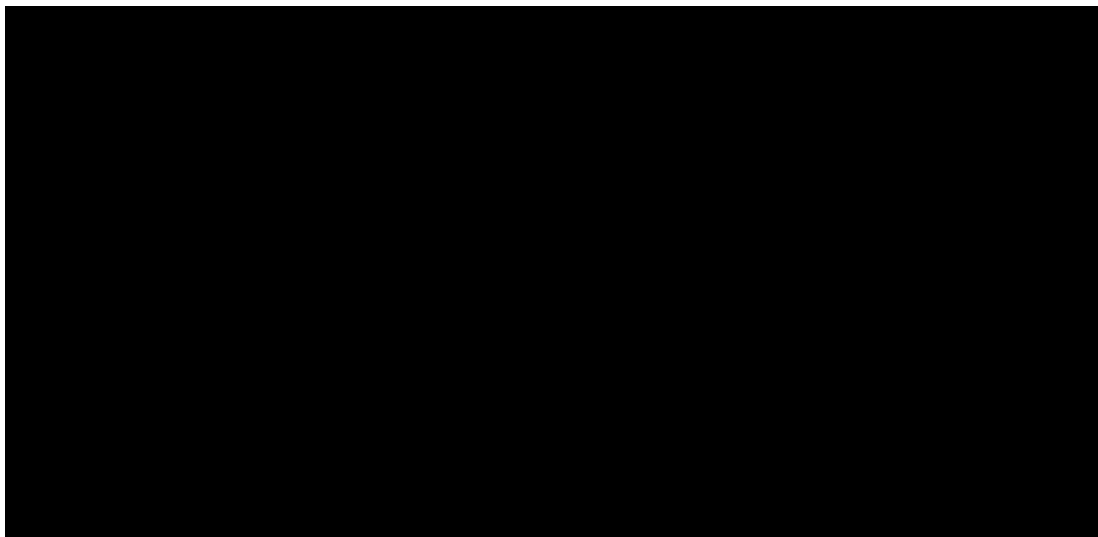
Από το στατιστικό έλεγχο που πραγματοποιήθηκε στο [REDACTED] προέκυψε p-value=0 και αφού είναι μικρότερο του 0.05 (alpha level), απορρίπτεται η αρχική υπόθεση ότι δεν υπάρχει γραμμική συσχέτιση. Οι τιμές ενδιαφέροντός μας είναι $R=0.8758$ και $R^2=0.777$, δηλαδή ένα [REDACTED]% των δεδομένων σχετίζεται γραμμικά, σύμφωνα με το τεστ.

➤ [REDACTED] ([REDACTED])



Σχήμα 4.31 Διάγραμμα WIP-CT για το [REDACTED]

Το [REDACTED] περιείχε ένα δείγμα [REDACTED] παρτίδων, εκ των οποίων ελήφθη υπόψη ένα ποσοστό [REDACTED]%, αφού [REDACTED] παρτίδες διαγράφηκαν ως outlier και είχαν $CT > [REDACTED]$ ώρες.



Σχήμα 4.32 Διάγραμμα Time-WIP για το [REDACTED]

Από το στατιστικό έλεγχο που πραγματοποιήθηκε στο [REDACTED] προέκυψε $p\text{-value} = 1 [REDACTED]$ και αφού είναι μικρότερο του 0.05 (alpha level), απορρίπτεται η αρχική υπόθεση ότι δεν υπάρχει γραμμική συσχέτιση. Οι τιμές ενδιαφέροντός μας είναι $R = 0.0474$ και $R^2 = 0.0022$, δηλαδή ένα [REDACTED]% των δεδομένων σχετίζεται γραμμικά, σύμφωνα με το τεστ.

Κεφάλαιο 5 Σχολιασμός - Συμπεράσματα

Το τελευταίο μέρος της διπλωματικής, αφορά το σχολιασμό και τη συζήτηση των διαφόρων αποτελεσμάτων, από τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα και την εξαγωγή συμπερασμάτων. Χωρίζεται σε δύο υποενότητες, εκ των οποίων η πρώτη σχετίζεται με την ανάλυση των διαγραμμάτων WIP-CT και Time-WIP και η δεύτερη με την ανάλυση των ιστογραμμάτων του CT των παρτίδων ανά [REDACTED]. Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη υποενότητα, θα μελετήσουμε τη συμπεριφορά του CT καθώς αυξάνεται με το WIP και αν είναι η αναμενόμενη, δηλαδή ισχύει έστω και κατά προσέγγιση ο νόμος του Little ($WIP = throughput \cdot CT$). Για το σκοπό αυτό, έχουν μετρηθεί τα απαραίτητα στατιστικά από το δείγμα ανά [REDACTED] και παρατίθενται αναλυτικά σε κατάλληλο πίνακα. Ακόμη, θα εξεταστεί η διακύμανση του WIP σε σχέση με το χρονικό ορίζοντα, ανά την κάθε περιοχή και θα εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την τάση αύξησης ή μείωσης του WIP για αυτές τις [REDACTED] εξεταζόμενες μέρες. Όσον αφορά στη δεύτερη υποενότητα, θα παρατηρήσουμε και θα αναφερθούμε σε ομοιότητες που παρουσιάζουν τα διάφορα ιστογράμματα CT μεταξύ τους και στις κατανομές που ταιριάζουν καλύτερα στα δεδομένα.

5.1 Σχολιασμός διαγραμμάτων WIP-CT και Time-WIP

Ξεκινώντας το σχολιασμό από τα διαγράμματα WIP-CT, γενικά θα περιμέναμε τα δεδομένα μας να διέπονται από μια σχέση WIP-CT παρόμοια με αυτή που υποδεικνύει ο νόμος του Little, δηλαδή μια ανάλογη σχέση. Κάτι τέτοιο ωστόσο δεν παρατηρείται στην περίπτωση αρκετών [REDACTED]. Συγκεκριμένα, στα [REDACTED], [REDACTED] και [REDACTED] απεικονίζεται μια δυσανάλογη σχέση, καθώς όσο αυξάνεται το WIP, μειώνεται το συνολικό CT που ξοδεύουν οι παρτίδες στις περιοχές αυτές. Ειδικά στα [REDACTED] και [REDACTED] ο ρυθμός πτώσης του CT με την αύξηση του WIP είναι ακόμη πιο έντονος. Σε άλλα [REDACTED] όπως τα [REDACTED] και [REDACTED] ο ρυθμός αύξησης του CT με την αύξηση του WIP είναι πολύ αργός, σε σημείο που θα μπορούσε κανείς να θεωρήσει το CT ανεξάρτητο του WIP και στα υπόλοιπα ([REDACTED] [REDACTED] παρατηρείται ένας μεγαλύτερος ρυθμός αύξησης του CT με το WIP, ο οποίος σε καμία περίπτωση δεν παραπέμπει σε αναλογία των δύο μεγεθών. Δύο βασικές εξηγήσεις υπάρχουν για αυτή τη συμπεριφορά. Η πρώτη είναι το γεγονός ότι ο νόμος του Little για να ισχύει, προϋποθέτει σταθερό throughput. Στην περίπτωσή μας, ο χρονικός ορίζοντας των [REDACTED]

ημερών κρίνεται πολύ περιορισμένος προκειμένου να υποθέσει κανείς ότι έχουμε σταθερό throughput. Σε ένα τόσο σύντομο χρονικό διάστημα είναι πολύ δύσκολο να εξάγει κανείς ένα σταθερό throughput, καθώς είναι πιθανό τις ■ αυτές μέρες να έχει μια πολύ συγκεκριμένη τάση και να εξαχθεί ένα παραπλανητικό συμπέρασμα. Γίνεται, επομένως, αντιληπτό πως η υπόθεσή μας για σταθερό throughput δεν είναι απόλυτα ακριβής. Η δεύτερη εξήγηση αφορά το γεγονός ότι το WIP και το CT παρουσιάζουν μια ανάλογη σχέση όταν μετρούνται στο απλούστερο επίπεδο μιας γραμμής παραγωγής, δηλαδή σε επίπεδο μηχανών. Είναι λογικό το CT μιας παρτίδας που ξεκινά να περιμένει για την επεξεργασία της σε ένα μηχάνημα, να επηρεάζεται από το WIP που αυτή «βλέπει» μπροστά της στο συγκεκριμένο μηχάνημα. Είναι δηλαδή, ανεξάρτητο από το WIP που μετριέται στα υπόλοιπα μηχανήματα του ίδιου ■ ■ ■ Στην ουσία και όπως έχει γίνει ήδη ξεκάθαρο στην παρούσα διπλωματική, το WIP που μετριέται για κάθε παρτίδα συμπεριλαμβάνει και τις παρτίδες που επεξεργάζονται και σε άλλες μηχανές του ■ ■ ■ (έχουμε τονίσει πως λόγω του όγκου των δεδομένων ήταν αδύνατο να γίνει η ανάλυση ανά μηχάνημα). Με αυτόν τον τρόπο, παρουσιάζεται η σχέση του CT με το WIP διαστρεβλωμένη ως ένα βαθμό.

Σε αυτό το σημείο παρατίθενται ορισμένα ενδιαφέροντα μεγέθη ανά ■ ■ ■ ■ ■ Η πρώτη κατηγορία αφορά τον αριθμό των παρτίδων που «είδε» μπροστά της η παρτίδα που ξεκίνησε πρώτη να περιμένει την επεξεργασία της για τις εν λόγω ■ ■ ■ μέρες. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει το πλήθος N του δείγματος, δηλαδή τον αριθμό των παρτίδων για τις οποίες μετρήθηκε το WIP. Στην τρίτη βρίσκεται το throughput του κάθε ■ ■ ■ υπολογισμένο διαιρώντας το πλήθος N με το χρονικό ορίζοντα σε ώρες (■ ημέρες=■ ώρες) και στην τέταρτη, το μέσο CT (σε ώρες) του ■ ■ ■ ως ο μέσος όρος των CT που ξοδεύουν σε αυτό όλες οι παρτίδες που το επισκέπτονται. Η πέμπτη κατηγορία περιέχει το γινόμενο το δύο προηγούμενων κατηγοριών και συμβολίζει το αναμενόμενο WIP με βάση το throughput που υποτέθηκε και το CT που μετρήθηκε. Στην έκτη έχουμε το μέσο όρο των πραγματικών WIP που «είδε» μπροστά της η κάθε παρτίδα, τα οποία υπολογίστηκαν με τον τρόπο που περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα και στην έβδομη υπολογίζεται η απόκλιση ανάμεσα στο πραγματικό μέσο WIP και το αναμενόμενο WIP της πέμπτης κατηγορίας που βρίσκουμε με την εφαρμογή του νόμου του Little. Οι 4 τελευταίες κατηγορίες περιέχουν το εύρος και την τυπική απόκλιση των δεδομένων του WIP και του CT. Ακολουθεί ο εν λόγω πίνακας σε δύο μέρη:

# προηγούμενων παρτίδων					
πλήθος δείγματος N					
TH (lot/hr)					
avg CT (hr)					
TH*avg CT					
actual (avg) WIP					
απόλυτη % απόκλιση					
εύρος WIP					
εύρος CT (hr)					
std WIP					
std CT (hr)					

Πίνακας 5.1 Στατιστικά και μέτρα απόδοσης (1^ο μέρος)

# προηγούμενων παρτίδων				
πλήθος δείγματος N				
TH (lot/hr)				
avg CT (hr)				
TH*avg CT				
actual (avg) WIP				
απόλυτη % απόκλιση				
εύρος WIP				
εύρος CT (hr)				
std WIP				
std CT (hr)				

Πίνακας 5.2 Στατιστικά και μέτρα απόδοσης (2^ο μέρος)

Παρατηρώντας κανείς τις απόλυτες αποκλίσεις, γίνεται αντιληπτό πόσο μεγάλες σε αρκετά είναι. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται για τους δύο λόγους που αναφέρθηκαν λίγο παραπάνω.

Επιπλέον, από τα διαγράμματα TIME-WIP διακρίνουμε μεγάλους ρυθμούς αύξησης του WIP μέσα σε αυτές τις μέρες σε όλα τα εκτός από το στο οποίο παρατηρείται μια αργή μείωση του WIP στο πέρασμα του χρόνου και

το [REDACTED] που υπάρχει μια ραγδαία μείωση του WIP. Ωστόσο, σε αυτό το σημείο οφείλουμε να τονίσουμε ότι ένα χρονικό διάστημα [REDACTED] ημερών κρίνεται εξαιρετικά σύντομο ώστε να βγουν ορισμένα ασφαλή συμπεράσματα για την εξέλιξη του WIP. Το πιθανότερο είναι πως αν γινόταν η μελέτη για ένα ικανοποιητικό χρονικό ορίζοντα, θα παρατηρούσαμε στα περισσότερα, αν όχι σε όλα, [REDACTED] μια σταθερή εξέλιξη του WIP. Παρεμπιπτόντως, είναι απαραίτητο να επαναλάβουμε σε αυτό το σημείο ότι ένα μέρος του υπάρχοντος WIP μέσα στο εκάστοτε [REDACTED] δε συμπεριλήφθηκε στα δεδομένα της [REDACTED] και πρόκειται φυσικά για παρτίδες που ξεκίνησαν την επεξεργασία τους μόλις πριν τις «[REDACTED] 00:00». Το γεγονός αυτό αλλοιώνει ως ένα βαθμό τα αποτελέσματά μας.

Ακόμη, από τα τεστ που πραγματοποιήθηκαν στα δεδομένα των συγκεκριμένων διαγραμμάτων, απορρίφθηκε σε όλες τις περιπτώσεις η μηδενική υπόθεση, δηλαδή ότι δεν υπάρχει κανένας γραμμικός συσχετισμός ανάμεσα στα δεδομένα Time και WIP. Με άλλα λόγια υπάρχει, άλλες φορές σε μεγαλύτερο και άλλες σε μικρότερο βαθμό, μια γραμμικότητα ανάμεσα στα δύο μεγέθη. Το αποτέλεσμα αυτό είναι πραγματικά πολύ σημαντικό, δεδομένου ότι μας δίνει τη δυνατότητα για κάποια χρονική στιγμή που ξεκινά μια παρτίδα να αναμένει την επεξεργασία της στην περιοχή παραγωγής, να χρησιμοποιηθεί η ευθεία που έδωσε η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης και με μια ορισμένη πιθανότητα να προβλεφθεί σωστά το αναμενόμενο WIP που συναντά η παρτίδα αυτή μπροστά της εκείνη τη στιγμή. Η πιθανότητα αυτή δίνεται από το R^2 και, όπως έχουμε ήδη τονίσει, είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερο είναι και αυτό το μέγεθος. Ένας εμπειρικός στατιστικός κανόνας θεωρεί πως υπάρχει ικανοποιητικός γραμμικός συσχετισμός των δεδομένων όταν ισχύει $R^2 > 0.8$. Υπό αυτό το πρίσμα, σε 3 [REDACTED] ([REDACTED] και [REDACTED] στα οποία και ισχύει ο παραπάνω κανόνας, μπορούμε να ισχυριστούμε ότι έχουμε ικανοποιητική γραμμική συσχέτιση των Time και WIP. Ακόμη και στα υπόλοιπα [REDACTED] το R^2 προσεγγίζει αρκετά το 0.8, που σημαίνει ότι και σε αυτές τις περιπτώσεις τα δεδομένα συσχετίζονται γραμμικά σε μεγάλο βαθμό. Εξαίρεση αποτελούν τα [REDACTED] και [REDACTED] όπου τα αντίστοιχα R^2 των τεστ απείχαν αρκετά από το απαιτούμενο επίπεδο.

5.2 Σχολιασμός ιστογραμμάτων CT

Όσον αφορά στο κομμάτι των ιστογραμμάτων του συνολικού CT που ξόδεψε κάθε παρτίδα στο εκάστοτε [REDACTED], μπορεί κανείς με μια προσεκτική ματιά να αντιληφθεί μια ομοιότητα. Σε ιστογράμματα αρκετών [REDACTED] ([REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] και [REDACTED] τα δεδομένα μοιάζουν να προσεγγίζουν την εκθετική κατανομή. Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις το μεγαλύτερο πλήθος των παρτίδων σημειώνει μικρό CT, κάτι που απεικονίζεται στις πρώτες κλάσεις των δεδομένων που φαίνεται να παρουσιάζουν μεγάλη συχνότητα. Καθώς αυξάνεται το CT των παρτίδων, παρατηρείται μια κλιμακούμενη μείωση της συχνότητας των παρτίδων, μέχρι να φτάσουμε σε μεγάλα CT, όπου εκεί οι παρτίδες είναι πραγματικά περιορισμένες σε αριθμό. Αυτή η συμπεριφορά συναντάται, εν γένει με διάφορες αποκλίσεις, σε όλα τα [REDACTED]. Δεν είναι τυχαίο, άλλωστε, το γεγονός ότι η πιο ταιριαστή κατανομή, σύμφωνα με το τεστ που πραγματοποιήθηκε στη matlab και αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, ήταν μία της οικογενείας της εκθετικής κατανομής. Όταν λέμε της οικογενείας, εννοούμε τόσο την «gamma», όσο και την «Weibull», οι οποίες αποτελούν και γενικεύσεις της. Μάλιστα, οι συγκεκριμένες κατανομές εμφανίζονταν από το τεστ στις περισσότερες περιπτώσεις με διαφορετική σειρά ως πιο ταιριαστές κατανομές στα δεδομένα των ιστογραμμάτων, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες κατανομές. Δίνοντας έμφαση στην p-value των τεστ, γίνεται κατανοητό πως στις περισσότερες περιπτώσεις τα δεδομένα είτε ταιριάζουν είτε βρίσκονται αρκετά κοντά τουλάχιστον σε μια κατανομή. Τρία [REDACTED] περνούν κάποιο τεστ, ενώ άλλα τέσσερα δεν καταφέρνουν για μικρή τάξης μεγέθους διαφορά p-value με alpha level να ταιριάζουν ικανοποιητικά με κάποια κατανομή. Παρατηρούμε όμως, πως όσο περισσότερα δεδομένα διαθέτουμε για κάποιο [REDACTED], τόσο δυσχεραίνει η προσπάθεια να ταιριάζουν με κάποια κατανομή. Ενδεικτική είναι άλλωστε και η πολύ μικρή p-value που παρουσιάζουν τα δεδομένα των [REDACTED] και [REDACTED] στα τεστ στη matlab. Αυτή είναι λοιπόν η εξήγηση για ποιο λόγο να αποκλίνουν τόσο από κάποια κατανομή τα δεδομένα των «πολυσύχναστων» [REDACTED].

5.3 Σχολιασμός διαγραμμάτων CT-operations

Όπως κατέστη ήδη σαφές, πραγματοποιήθηκε μια μελέτη γύρω από το CT των παρτίδων, προκειμένου να αντιληφθούμε αν εξαρτάται καθόλου από το πλήθος των επεξεργασιών (operations), που υφίσταται η κάθε παρτίδα. Πριν ακόμη εφαρμοστεί η

ανάλυσή μας, αναμέναμε το CT να αυξάνεται, όσο περισσότερες επεξεργασίες υφίσταται κάθε παρτίδα. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιήθηκε η γραμμική παλινδρόμηση ως εντολή του excel. Για κάθε ██████████ που εφαρμόστηκε, παρατηρούμε μια θετική κλίση στα διαγράμματα του κύκλου χρόνου με το πλήθος των επεξεργασιών. Η κλίση δεν προσεγγίζει σε καμία περίπτωση την αναλογία ανάμεσα στα δύο μεγέθη, ωστόσο δείχνει σε κάποιο βαθμό πως σε μεγάλους CT συναντώνται περισσότερα operations. Ωστόσο, εδώ είναι απαραίτητο να ξεκαθαρίσουμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις ο στατιστικός έλεγχος που πραγματοποιήθηκε έδειξε ότι η ευθεία που δίνεται από τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης δεν αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά τα ζεύγη σημείων του διαγράμματος (αναφορικά με την p-value). Για αυτό το λόγο κρατούμε μια επιφύλαξη για τα αποτελέσματά μας.

Αυτά είναι τα κυριότερα σχόλια σχετικά με τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής. Συνοψίζοντας, αξίζει να απομονώσουμε τους δύο βασικούς παράγοντες που διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στα αποτελέσματά μας. Ο πρώτος, όπως έχουμε τονίσει αρκετές φορές, είναι η μεγάλη διασπορά σε δεδομένα μεγάλου όγκου που επιδρά ανασταλτικά στην εξαγωγή λεπτομερών και αμερόληπτων αποτελεσμάτων. Ο δεύτερος είναι το σύντομο χρονικό διάστημα για το οποίο εξετάζονται τα δεδομένα, κάτι που μας οδηγεί σε μια πιο περιορισμένη αντίληψη της πραγματικότητας. Παρόλα αυτά, οι αναλύσεις μας έχουν πραγματοποιηθεί σε κάθε περίπτωση με ξεκάθαρο τρόπο και τα αποτελέσματα διέπονται από συγκεκριμένες επιστημονικά αποδεκτές αρχές.

Βιβλιογραφία

- Chandler-Gilbert Community College Learning Center. *Analyzing Linear Regression with EXCEL*. Ανάκτηση από www.cgc.edu
- Chien, C.-F., Dauzère-Pérès, S., Ehm, H., Fowler, J. W., Jiang, Z., Krishnaswamy, S., Mönch, L. and Uzsoy, R., (2011, July). Modelling and analysis of semiconductor manufacturing in a shrinking world: Challenges and successes. *European J of industrial engineering*, σσ. 2093-2096.
- Connors, D. P., Feigin, G. E. and Yao, D., (1996). A Queueing network model for semiconductor manufacturing. *IEEE Transactions on semiconductor manufacturing*, 412-415.
- ECSEL, (2017). Description of Action. *Electronics and ICT as enabler for digital industry and optimized supply chain management covering the entire product lifecycle*, (σσ. 39-40, 45-47).
- Geng, N. and Jiang, Z., (2007, December 11). A review on strategic capacity planning for the semiconductor manufacturing industry. *International Journal of Production Research*, σσ. 3639-3643.
- Gupta, J. N. D., Ruiz, R., Fowler, J. W and Mason, S. J., (2006). Operational planning and control of semiconductor wafer production. *Production Planning & Control*, 640-644.
- Islam, M. M., (2010). Recent Challenges in Semiconductor Industry and the Future. *ETE 411.3*, 1-6.

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]

Mönch, L., Fowler, J. W. and Mason, S. J., (2013). *Production Planning and Control for Semiconductor Wafer Fabrication Facilities*. New York: Springer.

Mönch, L., Fowler, J. W., Dautère-Pérès, S., Mason, S. J. and Rose, O., (2011). A survey of problems, solution techniques, and future challenges in scheduling semiconductor manufacturing operations. *J Sched*, 583-586.

Tirkel, I. and Parment Y., (2017). Identification of Statistical Distributions for Cycle Time in Wafer Fabrication. *IEEE Transactions on semiconductor manufacturing*, 90-95.

Uzsoy R., Lee, C.-Y. and Martin-Vega, L. A., (1992). A Review of production planning and scheduling models, PART I: System characteristics, performance evaluation and production planning. *IIE Transactions*, 47-56.

Uzsoy R., Lee, C.-Y. and Martin-Vega, L. A., (1994). A Review of production planning and scheduling models in the semiconductor industry, Part II: Shop-Floor control. *IIE Transactions*, 44-51.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Κώδικας υπολογισμού καλύτερης κατανομής

```
function[D PD] = allfitdist(data,sortby,varargin)
%[...] = ALLFITDIST(DATA,SORTBY) returns the struct of valid distributions
% sorted by the parameter SORTBY
% NLogL - Negative of the log likelihood
% BIC - Bayesian information criterion (default)
% AIC - Akaike information criterion
% AICc - AIC with a correction for finite sample sizes
%[...] = ALLFITDIST(...,'PDF') or (...,'CDF') plots either the PDF or CDF
% of a subset of the fitted distribution. The distributions are plotted in
% order of fit, according to SORTBY.
% List of distributions it will try to fit
% Continuous (default)
% Beta
% Birnbaum-Saunders
% Exponential
% Extreme value
% Gamma
% Generalized extreme value
% Generalized Pareto
% Inverse Gaussian
% Logistic
% Log-logistic
% Lognormal
% Nakagami
% Normal
% Rayleigh
% Rician
% t location-scale
% Weibull
%% Check Inputs
if nargin == 0
    data = 10.^((normrnd(2,10,1e4,1))/10);
    sortby='BIC';
    varargin={'CDF'};
end
if nargin==1
    sortby='BIC';
end
sortbyname={'NLogL','BIC','AIC','AICc'};
if ~any(ismember(lower(sortby),lower(sortbyname)))
    oldvar=sortby; %May be 'PDF' or 'CDF' or other commands
    if isempty(varargin)
        varargin={oldvar};
    else
        varargin=[oldvar varargin];
    end
end
```



```

end
sortby='BIC';
end
if nargin < 2, sortby='BIC'; end
distname={'beta', 'birnbaumsaunders', 'exponential', ...
'extreme value', 'gamma', 'generalized extreme value', ...
'generalized pareto', 'inversegaussian', 'logistic', 'loglogistic', ...
'lognormal', 'nakagami', 'normal', ...
'rayleigh', 'rician', 'tlocationscale', 'weibull'};
if ~any(strcmpi(sortby,sortbyname))
error('allfitdist:SortBy','Sorting must be either NLogL, BIC, AIC, or AICc');
end
%Input may be mixed of numeric and strings, find only strings
vin=varargin;
strs=find(cellfun(@(vs)ischar(vs),vin));
vin(strs)=lower(vin(strs));
%Next check to see if 'PDF' or 'CDF' is listed
numplots=sum(ismember(vin(strs),{'pdf','cdf'}));
if numplots>=2
error('ALLFITDIST:PlotType','Either PDF or CDF must be given');
end
if numplots==1
plotind=true; %plot indicator
indxpdf=ismember(vin(strs),'pdf');
plotpdf=any(indxpdf);
indxcdf=ismember(vin(strs),'cdf');
vin(strs(indxpdfindxcdf))=[]; %Delete 'PDF' and 'CDF' in vin
else
plotind=false;
end
%Check to see if discrete
strs=find(cellfun(@(vs)ischar(vs),vin));
indxdis=ismember(vin(strs),'discrete');
discind=false;
if any(indxdis)
discind=true;
distname={'binomial', 'negative binomial', 'poisson'};
vin(strs(indxdis))=[]; %Delete 'DISCRETE' in vin
end
strs=find(cellfun(@(vs)ischar(vs),vin));
n=numel(data); %Number of data points
data = data(:);
D=[];
%Check for NaN's to delete
deldatanan=isnan(data);
%Check to see if frequency is given
indxfr=ismember(vin(strs),'frequency');
if any(indxfr)
freq=vin{1+strs((indxfr))}; freq=freq(:);
if numel(freq)~=numel(data)

```

```

error('ALLFITDIST:PlotType','Matrix dimensions must agree');
end
delfnan=isnan(freq);
data(deldatanan\delfnan)=[]; freq(deldatanan\delfnan)=[];
%Save back into vin
vin{1+strs((indx))}=freq;
else
data(deldatanan)=[];
end
%% Run through all distributions in FITDIST function
warning('off','all'); %Turn off all future warnings
for indx=1:length(distname)
try
dname=distname{indx};
switch dname
case 'binomial'
PD=fitbinocase(data,vin,strs); %Special case
case 'generalized pareto'
PD=fitgpcase(data,vin,strs); %Special case
otherwise
%Built-in distribution using FITDIST
PD = fitdist(data,dname,vin{:});
end

NLL=PD.NLogL; % -Log(L)
%If NLL is non-finite number, produce error to ignore distribution
if ~isfinite(NLL)
error('non-finite NLL');
end
num=length(D)+1;
PDs(num) = {PD}; %#ok<AGROW>
k=numel(PD.Params); %Number of parameters
D(num).DistName=PD.DistName;
D(num).NLogL=NLL;
D(num).BIC=-2*(-NLL)+k*log(n);
D(num).AIC=-2*(-NLL)+2*k;
D(num).AICc=(D(num).AIC)+((2*k*(k+1))/(n-k-1));
D(num).ParamNames=PD.ParamNames;
D(num).ParamDescription=PD.ParamDescription;
D(num).Params=PD.Params;
D(num).Paramci=PD.paramci;
D(num).ParamCov=PD.ParamCov;
D(num).Support=PD.Support;
catch err %#ok<NASGU>
%Ignore distribution
end
end
warning('on','all'); %Turn back on warnings
if numel(D)==0
error('ALLFITDIST:NoDist','No distributions were found');

```

```

end
%% Sort distributions
indx1=1:length(D); %Identity Map
sortbyindx=find(strcmpi(sortby,sortbyname));
switch sortbyindx
case 1
[~,indx1]=sort([D.NLogL]);
case 2
[~,indx1]=sort([D.BIC]);
case 3
[~,indx1]=sort([D.AIC]);
case 4
[~,indx1]=sort([D.AICc]);
end
%Sort
D=D(indx1); PD = PDs(indx1);
%% Plot if requested
if plotind;
plotfigs(data,D,PD,vin,stras,plotpdf,disind)
end
end
function PD=fitbinocase(data,vin,stras)
%% Special Case for Binomial
% 'n' is estimated if not given
vinbino=vin;
%Check to see if 'n' is given
indxn=any(ismember(vin(strs),'n'));
%Check to see if 'frequency' is given
indxfreq=ismember(vin(strs),'frequency');
if ~indxn
%Use Method of Moment estimator
%E[x]=np, V[x]=np(1-p) -> nhath=E/(1-(V/E));
if isempty(indxfreq)||~any(indxfreq)
%Raw data
mnx=mean(data);
nhath=round(mnx/(1-(var(data)/mnx)));
else
%Frequency data
freq=vin{1+stras(indxfreq)};
m1=dot(data,freq)/sum(freq);
m2=dot(data.^2,freq)/sum(freq);
mnx=m1; vx=m2-(m1^2);
nhath=round(mnx/(1-(vx/mnx)));
end
%If nhath is negative, use maximum value of data
if nhath<=0, nhath=max(data(:)); end
vinbino{end+1}='n'; vinbino{end+1}=nhath;
end
PD = fitdist(data,'binomial',vinbino{:});
end

```

```

function PD=fitgpcase(data,vin, strs)
%% Special Case for Generalized Pareto
% 'theta' is estimated if not given
vingp=vin;
%Check to see if 'theta' is given
indxtheta=any(ismember(vin(strs),'theta'));
if ~indxtheta
    %Use minimum value for theta, minus small part
    thetahat=min(data(:))-10*eps;
    vingp{end+1}='theta'; vingp{end+1}=thetahat;
end
PD = fitdist(data,'generalized pareto',vingp{:});
end
function plotfigs(data,D,PD,vin, strs,plotpdf, discind)
%Plot functionality for continuous case due to Jonathan Sullivan
%Modified by author for discrete case
%Maximum number of distributions to include
%max_num_dist=Inf; %All valid distributions
max_num_dist=4;

%Check to see if frequency is given
indx=ismember(vin(strs),'frequency');
if any(indx)
    freq=vin{1+strs((indx))};
end
figure
%% Probability Density / Mass Plot
if plotpdf
    if ~discind
        %Continuous Data
        nbins = max(min(length(data)./10,100),50);
        xi = linspace(min(data),max(data),nbins);
        dx = mean(diff(xi));
        xi2 = linspace(min(data),max(data),nbins*10)';
        fi = histc(data,xi-dx);
        fi = fi./sum(fi)./dx;
        inds = 1:min([max_num_dist,numel(PD)]);
        ys = cellfun(@(PD) pdf(PD,xi2),PD(inds),'UniformOutput',0);
        ys = cat(2,ys{:});
        bar(xi,fi,'FaceColor',[160 188 254]/255,'EdgeColor','k');
        hold on;
        plot(xi2,ys,'LineWidth',1.5)
        legend(['empirical',{D(inds).DistName}], 'Location','NE')
        xlabel('Value');
        ylabel('Probability Density');
        title('Probability Density Function');
        grid on
    else
        %Discrete Data
        xi2=min(data):max(data);

```

```

%xi2=unique(x); %If only want observed x-values to be shown
indx=ismember(vin(strs),'frequency');
if any(indx)
fi=zeros(size(xi2));
fi((ismember(xi2,data)))=freq; fi=fi./sum(fi);
else
fi=histc(data,xi2); fi=fi./sum(fi);
end
inds = 1:min([max_num_dist,numel(PD)]);
ys = cellfun(@(PD) pdf(PD,xi2),PD(inds),'UniformOutput',0);
ys=cat(1,ys{:});
bar(xi2,[fi ys]);
legend(['empirical',{D(inds).DistName}], 'Location','NE')
xlabel('Value');
ylabel('Probability Mass');
title('Probability Mass Function');
grid on
end
else
%Cumulative Distribution
if ~discind
%Continuous Data
[fi xi] = ecdf(data);
inds = 1:min([max_num_dist,numel(PD)]);
ys = cellfun(@(PD) cdf(PD,xi),PD(inds),'UniformOutput',0);
ys = cat(2,ys{:});
if max(xi)/min(xi) > 1e4; lgx = true; else lgx = false; end
subplot(2,1,1)
if lgx
semilogx(xi,fi,'k',xi,ys)
else
plot(xi,fi,'k',xi,ys)
end
legend(['empirical',{D(inds).DistName}], 'Location','NE')
xlabel('Value');
ylabel('Cumulative Probability');
title('Cumulative Distribution Function');
grid on
subplot(2,1,2)
y = 1.1*bsxfun(@minus,ys,fi);
if lgx
semilogx(xi,bsxfun(@minus,ys,fi))
else
plot(xi,bsxfun(@minus,ys,fi))
end
ybnds = max(abs(y(:)));
ax = axis;
axis([ax(1:2) -ybnds ybnds]);
legend({D(inds).DistName}, 'Location','NE')
xlabel('Value');

```

```

ylabel('Error');
title('CDF Error');
grid on
else
%Discrete Data
indxf=ismember(vin(strs),'frequency');
if any(indxf)
[fi xi] = ecdf(data,'frequency',freq);
else
[fi xi] = ecdf(data);
end
%Check unique xi, combine fi
[xi,ign,indx]=unique(xi); %#ok<ASGLU>
fi=accumarray(indx,fi);
inds = 1:min([max_num_dist,numel(PD)]);
ys = cellfun(@(PD) cdf(PD,xi),PD(inds),'UniformOutput',0);
ys=cat(2,ys{:});
subplot(2,1,1)
stairs(xi,[fi ys]);
legend(['empirical',{D(inds).DistName}], 'Location','NE')
xlabel('Value');
ylabel('Cumulative Probability');
title('Cumulative Distribution Function');
grid on
subplot(2,1,2)
y = 1.1*bsxfun(@minus,ys,fi);
stairs(xi,bsxfun(@minus,ys,fi))
ybnds = max(abs(y(:)));
ax = axis;
axis([ax(1:2) -ybnds ybnds]);
legend({D(inds).DistName}, 'Location','NE')
xlabel('Value');
ylabel('Error');
title('CDF Error');
grid on
end
end
end

```

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Κώδικας για καταμέτρηση WIP

```
sheet_num=13;
[~,~,A]=xlsread('mine-Hist_Material_Flow_RtP1_010117-150117(dokimi).xlsx',sheet_num);

wip=zeros(size(A(:,1),1),1);
pos=1;

for i=2:size(A(:,1),1)
    i
    flag=0;

    for k=pos:(i-1)

        if( compare(A{k,3},A{i,2})==1 )

            if flag==0
                flag=1;
                pos=k;
            end
            wip(i)=wip(i)+1;
        end
    end
end

t=array2table(wip);
% filename = 'mine-Hist_Material_Flow_RtP1_010117-150117(dokimi).xlsx';
% writetable(t,filename,'sheet',sheet_num,'Range','D1','WriteRowNames',false)

function[ result ] = compare(third_col, second_col )
%% returns 1 if third_col > second_col

% third_col = '6/12/2016 7:33:00 πμ';
% second_col = '6/1/2017 10:12:00 πμ';

a1split = strsplit(third_col, ' ');
a2split = strsplit(char(a1split(:,1)) , '/');
a3split = strsplit(char(a1split(:,2)) , ':');
a1 = str2num( char(a2split(:,1)) );
a2 = str2num( char(a2split(:,2)) );
a3 = str2num( char(a2split(:,3)) );
a4 = str2num( char(a3split(:,1)) );
a5 = str2num( char(a3split(:,2)) );
a6 = str2num( char(a3split(:,3)) );
% a7 = char(a1split(:,3));
% if(strcmp(a7,'πμ'))
% a7 = 0;
% else
```

```

% a7 = 1;
% end

b1split = strsplit(second_col, ' ');
b2split = strsplit(char(b1split(:,1)) , '/');
b3split = strsplit(char(b1split(:,2)) , ':');
b1 = str2num( char(b2split(:,1)) );
b2 = str2num( char(b2split(:,2)) );
b3 = str2num( char(b2split(:,3)) );
b4 = str2num( char(b3split(:,1)) );
b5 = str2num( char(b3split(:,2)) );
b6 = str2num( char(b3split(:,3)) );
% b7 = char(b1split(:,3));
% if(strcmp(b7,' $\pi\mu$ '))
% b7 = 0;
% else
% b7 = 1;
% end

true = 1;
false = 0;

if a3>b3
    result=true; %a>b or A(k,3)>A(i,2)
else if a3<b3
    result=false;
else
    if a2>b2
        result=true;
    else if a2<b2
        result=false;
    else
        if a1>b1
            result=true;
        else if a1<b1
            result=false;
        else
            if a4>b4
                result=true;
            else if a4<b4
                result=false;
            else
                if a5>b5
                    result=true;
                else
                    result=false; %an mpainei idia stigmi pou vgainei to A(k,3) tote de to metrao
                end
            end
        end
    end
end
end
end
end

```


end
end
end
end
end